

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroniky

Dimenzování brzdné jednotky s DC motorem napájeným
z pulzního měniče s využitím programu Matlab-Simulink

Braking Unit Design with DC Motor Supply by Chopper Using
Software Matlab-Simulink

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Neděla**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612T015 Elektronika

Téma: Dimenzování brzdné jednotky s DC motorem napájeným z pulzního měniče s využitím programu Matlab-Simulink
Braking Unit Design with DC Motor Supply by Chopper Using Software Matlab-Simulink

Zásady pro vypracování:

1. Sestavení matematického a simulačního modelu DC motoru s uvažováním ztrát
2. Sestavení matematického a simulačního modelu pulzního měniče s uvažováním ztrát
3. Simulační ověření rychlostní regulace DC pohonu s pulzním měničem
4. Analýza poměrů a dimenzování brzdné jednotky pro vybrané situace pohonu

Seznam doporučené odborné literatury:

NEBORÁK, I.: Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů. Monografie, VŠB-TU Ostrava 2002, 172 stran, ISBN 80-248-0083-7.

FLAJTINGR, J. – KULE, L.: Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči. Západočeská univerzita v Plzni, 2002, 142 stran. ISBN 80-7082-919-2.

Neborák, I.: Elektrické regulované pohony II. Učební texty pro kombinované a distanční studium. VŠB-TU Ostrava 2005.

HRABOVCOVÁ V., RAFAJDUS P., FRANKO M., HUDÁK P.. Meranie a modelovanie elektrických strojov. 2. vydání. Žilinská Univerzita, 2009. 335 s. ISBN 978-80-8070-924-2.

HRABOVCOVÁ V., RAFAJDUS P.. Elektrické stroje: Teorie a příklady. 1. vydání. Žilinská Univerzita, 2009. 415 s. ISBN 978-80-554-0101-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry

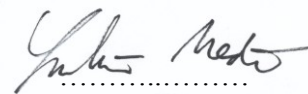


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 5. května 2015



.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Ivovi Neborákovi, CSc. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Předmětem této diplomové práce je dimenzování brzdné jednotky pro DC motor napájený z pulzního měniče včetně uvažování ztrát. V práci je uveden základní rozbor stejnosměrného motoru, pulzního měniče a dimenzování brzdné jednotky pro vybrané situace. V programu Matlab-Simulink byly vytvořeny matematické modely DC motoru, pulzního měniče a regulační struktury. V modelech DC motoru a pulzního měniče jsou zahrnuty ztráty. Pro vybrané situace pohonu jsou navrženy odpovídající brzdné jednotky.

Klíčová slova

DC motor, pulzní měnič, ztráty, brzdná jednotka, rychlostní regulace, Matlab, Simulink, matematický model

Abstract

The subject of this thesis is the design of the braking unit with DC motor supply chopper with including considering losses. The work includes basic analysis of DC motor, chopper and dimensioning braking unit for the selected situation. In Matlab Simulink were created mathematical models of DC motor control, chopper and regulatory structures. In the models DC motor and chopper are included losses. For chosen situations for the drive are designed corresponding braking unit.

Key words

DC motor, pulse converter, loss, braking unit, speed kontrol, Matlab, Simulink, mathematical model

Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Název	Jednotka
c	Konstanta buzení	[-]
F	Přenosová funkce	
f	Frekvence	[Hz]
I	Proud	[A]
J	Moment setrvačnosti	[kg.m ²]
k	Konstanta pro výpočet	[-]
K	Konstanta zesílení	[-]
L_a	Vlastní indukčnosti motoru	[H]
L_{ac}	Celkové indukčnosti motoru	[H]
M_e	Moment motoru	[N.m]
M_z	Moment zátěže	[N.m]
m	Hmotnost	[kg]
n	Otáčky	[ot/min]
P_n	Jmenovitý výkon motoru	[W]
P_p	Příkon motoru	[W]
R_a	Odpor na vinutí kotvy	[Ω]
R_{ac}	Celkový odpor kotvy	[Ω]
R_b	Odpor v budícím vinutí	[Ω]
T	Časová konstanta	[s]
U	Napětí	[V]
U_i	Indukované napětí	[V]
U_r	Řídící napětí	[V]
ΔP	Ztráty	[W]
η	Účinnost	[-]
τ	Dopravní zpoždění	[s]
Ω_m	Mechanická úhlová rychlost	[rad/s]

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Stejnoseměrný stroj	2
2.1	Konstrukce	2
2.1.1	Stator	2
2.1.2	Rotor	3
2.1.3	Komutátor.....	3
2.1.4	Princip činnosti stejnosměrného stroje	3
2.2	Ztráty	4
2.2.1	Ztráty ve vinutí kotvy	5
2.2.2	Ztráty v budícím vinutí	5
2.2.3	Ztráty na kartáči.....	5
2.2.4	Mechanické ztráty	6
2.2.5	Ztráty v železe	6
2.2.6	Ztráty naprázdno.....	6
2.2.7	Přídavné ztráty.....	6
2.3	Matematický model stejnosměrného motoru	6
2.4	Simulační model DC motoru s uvažováním ztrát.....	8
3	Čtyřkvadrantový pulzní měnič	17
3.1	Princip činnosti.....	17
3.2	Ztráty	18
3.2.1	Ztráty na spínacích součástkách	18
3.2.2	Ztráty ve vodivých částech.....	19
3.2.3	Ztráty na polovodičových součástkách	19
3.2.4	Ztráty v řídicím obvodu	19
3.2.5	Konstantní ztráty	19
3.3	Matematický model pulzního měniče	20
3.4	Simulační model pulzního měniče s uvažováním ztrát	21
4	Simulační ověření rychlostní regulace DC pohonu s pulzním měničem	25
5	Analýza poměrů a dimenzování brzděné jednotky pro vybrané situace pohonu	29
6	Závěr.....	45
	Použitá literatura	46
	Seznam příloh	48
	Seznam elektronických příloh.....	49

1 Úvod

V první části si popíšeme konstrukci a princip stejnosměrného stroje. Rozebereme si ztráty, které vznikají ve stejnosměrném motoru. Sestavíme matematický model a následně sestavíme simulační model reálného motoru. Vyčíslíme ztráty a zavedeme do našeho modelu. Spustíme simulační model a ověříme správnost výpočtů. Následuje teoretický rozbor čtyřkvadrantového pulzního měniče a princip činnosti. Uvedeme si základní vztahy pro určení ztrát v měniči. Sestavíme matematický model včetně ztrát a ověříme na simulaci. Náš model doplníme o regulační strukturu rychlosti s podřazenou proudovou smyčkou. Spočítáme potřebné časové konstanty a zesílení PI regulátorů. Simulační model ověříme odezvou na jednotkový skok. V další kapitole rozšíříme model o převodovku a plošinu se zátěží. Zvolíme cyklus zvedání a spouštění. V modelu postupně změníme požadované parametry a pro každou situaci určíme vhodnou brzdnou jednotku.

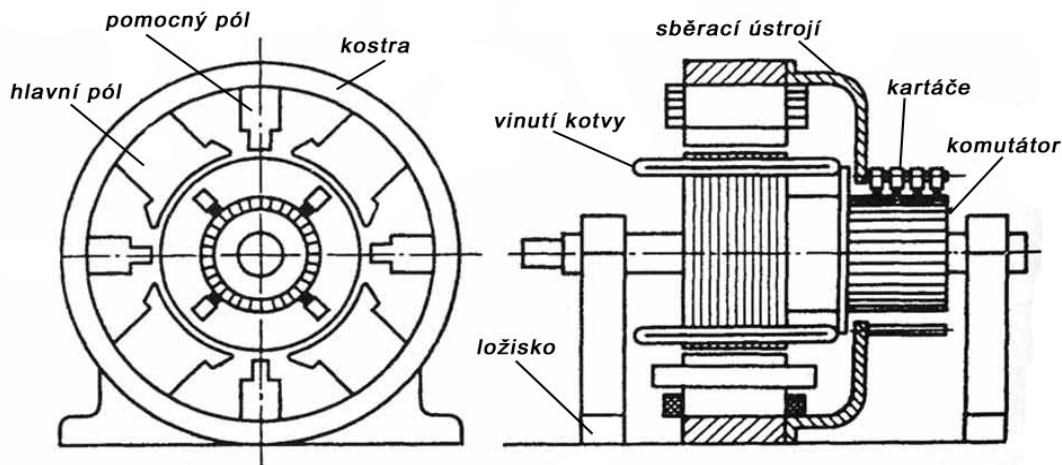
2 Stejnosměrný stroj

Mluvíme o historicky nejstarších strojích, které zprvu sloužili k výrobě stejnosměrného proudu. Podle způsobu užití dělíme stroje na ty, které dodávají energii (dynama) a které energii odebírají (motory). Stejnosměrné stroje se hojně používají především v regulovaných pohonech, robotice, automobilovém průmyslu, letectví.

V mnoha případech se stejnosměrný pohon upřednostňuje před střídavým, a to především z důvodu lepší regulace otáček, menší velikosti a hmotnosti. Výhodou je jejich velký rozběhový moment a malá časová konstanta. S postupem času se značně eliminovala i hlavní nevýhoda stejnosměrného motoru. Motor ke své funkci potřebuje kluzné kontakty, které spojují kartáče s komutátorem. Tím pádem vzniká jiskření, které je v určitých provozech nežádoucí (možnost výbuchu). Problém vyřešila tzv. elektronická komutace, tím vznikl bezkartáčový stejnosměrný motor. [2]

2.1 Konstrukce

Stejnosměrný motor se skládá ze dvou hlavních částí: stator a rotor (popřípadě komutátor).



Obrázek 1: Schematické uspořádání stejnosměrného stroje [8]

2.1.1 Stator

Jedná se o nepohyblivou část stroje. Po obvodu statoru se střídají hlavní a pomocné póly. Hlavní póly mají za úkol budit magnetické pole motoru. Pomocné póly napomáhají komutaci rotoru. Statorová část je tvořena buď trvalými magnety, nebo elektromagnetem.

2.1.2 Rotor

Je vnitřní pohyblivá část stroje, označuje se jako kotva. Tvoří ji cívky rozložené v drážkách, které jsou vyvedeny na mechanický komutátor. Pokud přivedeme elektrickou energii na cívky, vznikne rotorové magnetické pole. Interakcí statorového a rotorového magnetického pole se vytvoří pohyb.

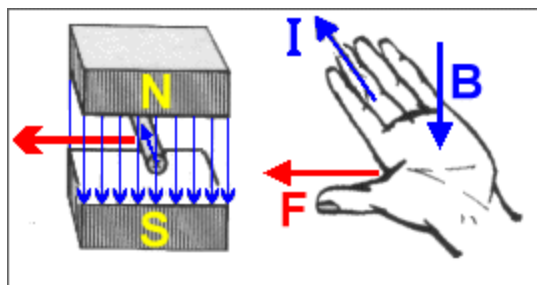
2.1.3 Komutátor

Nachází se na rotorové části stroje. Hlavním úkolem komutátoru je měnit směr proudu, který vede do rotorových cívek tak, aby byla napájena cívka pod aktivním pólem. Komutátor tvoří řada izolovaných vodivých lamel. Pomocí kartáčů se na lamely přivádí elektrická energie. Právě díky této mechanické části se stejnosměrné motory s komutátorem nehodí do prostředí, kde hrozí nebezpečí požáru nebo výbuchu.

2.1.4 Princip činnosti stejnosměrného stroje

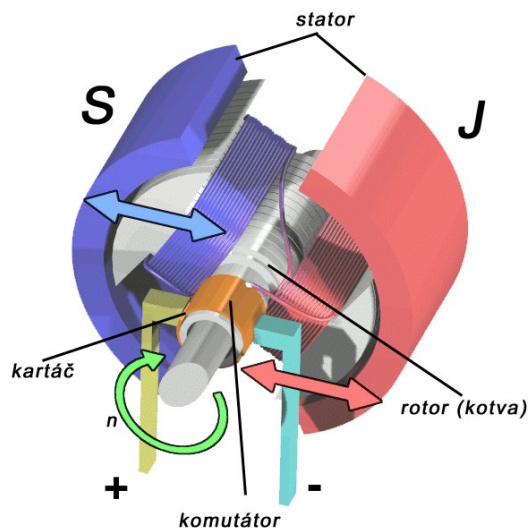
Na svorky motoru přivedeme stejnosměrný proud, který dále pokračuje na vinutí kotvy. Při průchodu proudu kotvou vzniká magnetické pole rotoru. Na vinutí kotvy působí magnetické pole, které vytváří permanentní magnety (popřípadě elektromagnety). Díky magnetické síle se motor otáčí. Směr otáčení je dán pravidlem levé ruky.

"Položíme-li levou ruku na vodič tak, aby indukční čáry vstupovaly do dlaně a natažené prsty ukazovaly směr proudu, ukazuje odchýlený palec směr působící síly." [3]



Obrázek 2: Pravidlo levé ruky [3]

Problém nastává při dosažení neutrální polohy. Neutrální poloha se nachází v ose mezi dvěma sousedními poli. Do neutrální polohy se kotva dostane při stále stejné polaritě proudu. Pro správný směr otáčení kotvy musíme měnit smysl proudu ve vinutí kotvy. Změna proudu nastává při přechodu mezi poli a zajišťuje ji komutátor. [2] [8]



Obrázek 3: *Princip stejnosměrného motoru [4]*

2.2 Ztráty

Pro určení ztrát v motoru musíme znát účinnost stroje, ta je dána poměrem výkonu P a příkonu P_p . Jelikož se jedná o přeměnu elektrické energie na mechanickou, nemůže být účinnost 1.

$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{P_p - \Delta P_M}{P_p} = \frac{P}{P + \Delta P_M} \quad (2.1)$$

kde výkon P stroje je dán vztahem (za předpokladu, že stroj pracuje jako motor)

$$P = U \cdot I \quad (2.2)$$

a příkon P_p (opět za předpokladu, že stroj pracuje jako motor)

$$P_p = U \cdot I \quad (2.3)$$

Rozdílem mezi příkonem a výkonem stroje jsou ztráty přeměněné na teplo.

$$\Delta P_M = P_p - P \quad (2.4)$$

Ztráty v motoru tvoří součet všech ztrát v dané konstrukci motoru. Určování ztrát v neregulovaných pohonech je mnohem jednodušší než u regulovaných. Regulované pohony obsahují tlumivky, transformátory a jiné prvky, které komplikují určení ztrát. Budeme vycházet z následující rovnice celkových ztrát:

$$\Delta P_M = \Delta P_J + \Delta P_b + \Delta P_{jk} + \Delta P_0 + \Delta P_{ad} \quad (2.5)$$

2.2.1 Ztráty ve vinutí kotvy

Často označované jako Jouleovy ztráty. Jsou to základní ztráty, které jsou závislé na proudu kotvy a odporu.

$$\Delta P_J = I_a^2 \cdot R_a \quad (2.6)$$

2.2.2 Ztráty v budícím vinutí

Jedná se o ztráty v budícím vinutí a trvale připojených odporech, které slouží k regulaci budícího proudu. Podle typu motoru se vypočítají pomocí následujících vztahů.

$$\Delta P_b = I_b^2 \cdot R_b \quad (2.7)$$

Ztráty v budícím vinutí jsou především u motorů, kde je budící vynutí určitým způsobem spojeno s obvodem kotvy. V našem případě nebudeme tyto ztráty zavádět do modelu.

2.2.3 Ztráty na kartáči

Vznikají přechodem proudu z kartáče na komutátor. Ztráty se odvíjejí podle druhu použitého materiálu kartáče. U uhlíkových kartáčů se většinou počítá úbytek napětí 1V na každý kartáč, při použití měděno-uhlíkových a měděno-grafitových kartáčů je úbytek zhruba 0,3V na každý kartáč. Tyto ztráty jsou součinem proudu a úbytku napětí v přechodové vrstvě kartáče, nezávisí na proudu a polaritě kartáče.

$$\Delta P_{jk} = I_a \cdot \Delta U_k \quad (2.8)$$

2.2.4 Mechanické ztráty

Mechanické ztráty jsou nezávislé od zátěže, a mají stejnou velikost i při chodu naprázdno. Za mechanické ztráty považujeme: ztráty v ložiskách, třením kartáčů na komutátoru, třením otáčejících se částí stroje, ztráty třením chladiva, ztráty ventilační.

2.2.5 Ztráty v železe

Jedná se o ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy, které vznikají při přemagnetování železného jádra kotvy. Ztráty v železe považujeme za nezávislé od zátěže a jsou stejné při chodu naprázdno. Určují se pomocí kalibrovaného motoru, nezatíženého motoru, metodou dynamometru, doběhovou zkouškou a nebo kalorimetricky odečtením mechanických ztrát od změřených ztrát.

2.2.6 Ztráty naprázdno

Tvoří je součet ztrát v železe ΔP_{fe} a mechanických ztrát ΔP_{me} . Ztráty jsou nezávislé na zátěži, takže mají stejné hodnoty i při zatížení. Určení přesných ztrát naprázdno je náročný proces, při kterém musíme znát velké množství proměnných a dokonale konstrukci stroje včetně průřezů vodičů, typ materiálu apod.

$$\Delta P_0 = \Delta P_{fe} + \Delta P_{me} \quad (2.9)$$

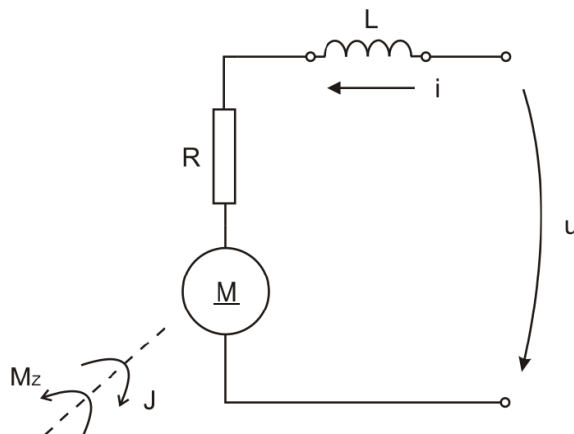
2.2.7 Přídavné ztráty

Přídavné ztráty ΔP_{ad} vznikají působením vířivých proudů v konstrukčních i aktivních částech stejnosměrného stroje a rozptylovými póly, které tvoří zatěžovací proud. Přídavné ztráty tvoří určitou část příkonu, mluvíme-li o motoru, anebo výkonu v případě generátoru. U kompenzovaných strojů tvoří tyto ztráty 0,5% P_N , u nekompenzovaných strojů 1% P_N . [11]

2.3 Matematický model stejnosměrného motoru

Matematický model stejnosměrného motoru s cizím (konstantním) buzením vychází ze soustavy rovnic, včetně zahrnutí elektromagnetických dějů. Obvykle předpokládáme zjednodušení následujících parametrů:

- konstantní hodnoty indukčnosti, odporu a $c\phi$
- zanedbání reakce kotvy



Obrázek 4: Zjednodušený model stejnosměrného motoru s cizím buzením

Pro model musí platit rovnováha v obvodu kotvy, která je dána součtem všech napětí na členech zjednodušeného modelu:

$$U = u_i + R_a I_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (2.10)$$

kde $R_a I_a$ určuje napětí na vinutí motoru, napětí na indukčnosti motoru určuje $L_a \frac{di_a}{dt}$ a indukované napětí u_i , pro které platí vztah:

$$u_i = c \phi \Omega_m \quad (2.11)$$

kde c je budící konstanta [-], ϕ magnetický indukční tok [Wb] a Ω_m je úhlová rychlost, která působí na hřídel motoru [rad/s].

Pro vytvoření modelu stejnosměrného motoru máme dva možné způsoby. První způsob spočívá přímo v řešení diferenciálních rovnic, a tím získání časových závislostí veličin i_a a Ω_m

Rovnice v časové oblasti	Rovnice po Laplac. transformaci	
$u_a = u_i + R_{ac} I_a + L_{ac} di_a/dt$	$U_a(p) = U_i(p) + R_{ac} I_a(p) + L_{ac} p I_a(p)$	(2.12)
$T_{ac} = L_{ac}/R_{ac}$	$U_a(p) = U_i(p) + R_{ac} I_a(p)(1 + p T_{ac})$	(2.13)
$u_i = c \phi \Omega_m$	$U_i(p) = c \phi \Omega_m(p)$	(2.14)
$M_e = c \phi i_a$	$M_e(p) = c \phi I_a(p)$	(2.15)
$M_e - M_L = J_c \frac{d\Omega_m}{dt}$	$M_e(p) - M_L(p) = J_c p \Omega_m(p)$	(2.16)

V elektrických pohonech se však mnohem častěji používá druhý způsob, a to přechod na operátorové přenosy a sestavení vhodného blokového schéma.

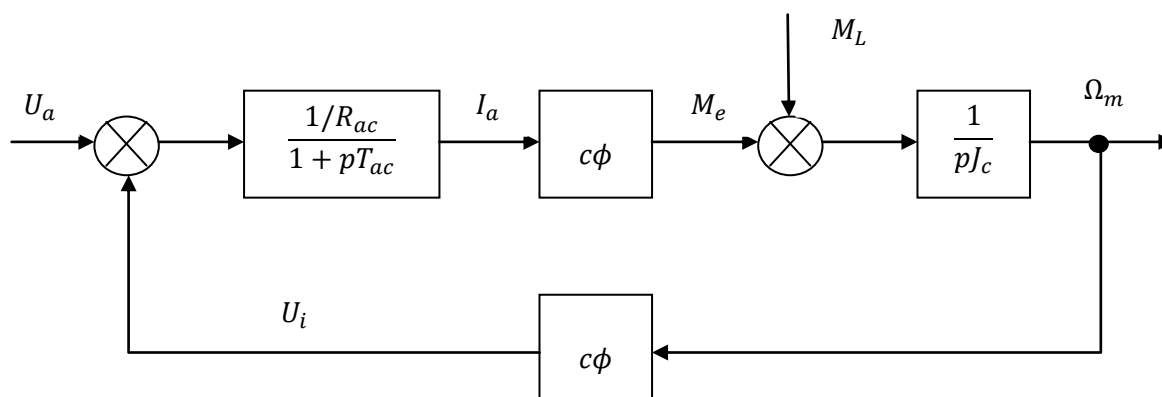
$$F_a(p) = \frac{I_a(p)}{U_a(p) - U_i(p)} = \frac{1/R_{ac}}{1 + pT_{ac}} \quad (2.17)$$

$$F_{c\phi}(p) = \frac{U_i(p)}{\Omega_m(p)} = c\phi \quad (2.18)$$

$$F_{c\phi}(p) = \frac{M_e(p)}{I_a(p)} = c\phi \quad (2.19)$$

$$F_m(p) = \frac{\Omega_m(p)}{M_e(p) - M_L(p)} = \frac{1}{pJ_c} \quad (2.20)$$

Po úpravě operátorových přenosů sestavíme blokové schéma stejnosměrného motoru. Následující blokové schéma je pro motor s konstantním buzením. [5] [7]



Obrázek 5: Blokové schéma stejnosměrného motoru s cizím konstantním buzením [5]

2.4 Simulační model DC motoru s uvažováním ztrát

Schéma simulačního modelu stejnosměrného motoru bude vycházet z blokového schématu na obrázku číslo 5. K vytvoření modelu v programu Matlab-Simulink nám vystačí standardní nabídka bloků z knihovny. Při vytváření modelu budeme vycházet z následujících hodnot reálného motoru TTN20 20Ab firmy MEZ Brno:

P_n	15 kW	R_a	0,489 Ω
U_a	440 V	L_a	7,33 mH
I_a	37,5 A	R_b	190 Ω
U_b	190 V	n_n	2800 ot./min.
I_b	1 A	J_m	0,24 kg. m ²

Tabulka č.1: Hodnoty reálného motoru

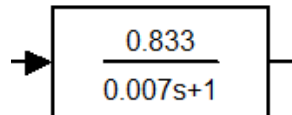
Celkový činný odpor a indukčnost kotvy (včetně měniče atd.):

$$R_{ac} = 1,201 \, \Omega \quad L_{ac} = 8,52 \, \text{mH}$$

Jako první určíme hodnoty pro operátorový přenos kotvy motoru Fa . Využijeme blok Transfer fcn. V čitateli zadáme hodnotu $1/R_{ac}$, do jmenovatele vypočítáme elektromagnetickou časovou konstantu a přičteme 1:

$$T_{ac} = \frac{L_{ac}}{R_{ac}} = \frac{0,00852}{1,201} = 0,007 = 7 \, \text{ms} \quad (2.21)$$

Výsledný blok bude vypadat jako obrázek číslo 6.



Obrázek 6: *Blok Transfer fcn pro operátorový přenos Fa*

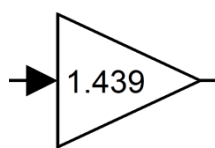
Následuje hodnota budící konstanty $c\phi$. Pro výpočet budící konstanty musíme znát jmenovitou úhlovou rychlost hřídele.

$$\Omega_m = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2800}{60} = 293 \, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.22)$$

Úhlovou rychlost již známe a můžeme dosadit do vzorce pro výpočet budící konstanty $c\phi$:

$$c\phi = \frac{U_{an} - R_a \cdot I_{an}}{\Omega_m} = \frac{440 - 0,489 \cdot 37,5}{293} = 1,439 \, \text{Vs} \quad (2.23)$$

Budící konstantu zavedeme do modelu pomocí bloku Gain. Blok Gain zesiluje signál o určitou konstantu. Výsledný blok Gain s budící konstantou bude vypadat následovně.

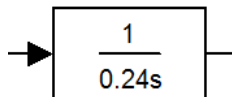


Obrázek 7: *Blok Gain s konstantou $c\phi$*

Jako další jsou v modelu použity bloky Add1 a Add2. Blok Add slouží k sčítání a odečítání hodnot. Add1 odečítá mechanické ztráty, a blok Add2 odečítá jmenovitý zatěžovací moment, který se vypočítá jako součin proudu a budící konstanty.

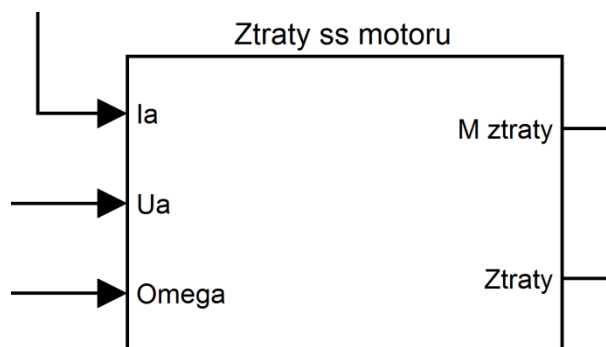
$$M_z = c\phi I_a = 1,439 \cdot 37,5 = 54 \text{ Nm} \quad (2.24)$$

Pro moment setrvačnosti motoru opět použijeme blok Transfer fcn. V čitateli zadáme hodnotu 1, ve jmenovateli pak hodnotu momentu setrvačnosti udávanou výrobcem $J_m = 0,24 \text{ kgm}^2$.



Obrázek 8: *Blok Transfer fcn pro moment setrvačnosti*

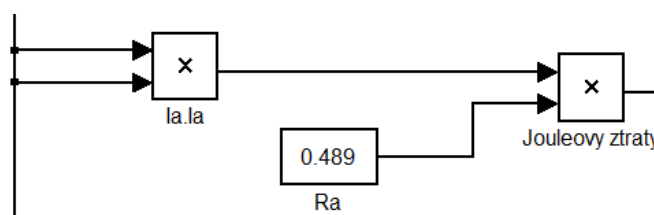
Model stejnosměrného motoru obsahuje i výpočet ztrát. Pro přehlednost celého modelu se ztráty ve stejnosměrném motoru řeší v bloku Subsystem s názvem „Ztraty ss motoru“, který má tři vstupní proměnné a dvě výstupní. Do bloku nám vstupuje proud kotvy (1), absolutní hodnota napájecího napětí motoru (2) a absolutní hodnota úhlové rychlosti (3). Výstupní proměnné jsou celkové ztráty (2) a moment ztrát (1). Blok Subsystem vypadá v modelu následovně.



Obrázek 9: Subsystem „Ztraty ss motoru“

Nyní si blíže rozebereme subsystem „Ztraty ss motoru“. Celkové ztráty v motoru tvoří součet Jouleových ztrát, přídavné ztráty, ztrát při přechodu na kartáči a ztrát naprázdno. Tyto ztráty jsou sečteny pomocí bloku Sum s názvem „Celkove ztraty“ a jsou dále poslány na výstup (2) subsytemu.

Jouleovy ztráty vypočítáme pomocí proudu a odporu kotvy. Pro násobení použijeme blok Product, ve kterém nejprve mezi sebou vynásobíme proud kotvy I_a a následně vynásobíme s odporem kotvy R_a .



Obrázek 10: Výpočet Jouleových ztrát pomocí bloku Matlab-Simulink

$$\Delta P_J = I_a^2 \cdot R_a = 37,5^2 \cdot 0,489 = 687,66 \text{ W} \quad (2.25)$$

Při určování ztrát na kartáči hodně závisí na celkovém zaokrouhlování hodnot, jelikož počítáme s celkem nízkým napětím. Napětí na kartáči určíme z rovnice, která nám udává součet všech napětí v motoru.

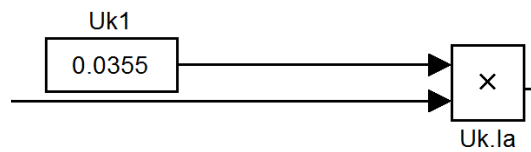
$$U = U_i + R_a \cdot I_a + \Delta U_k = c\phi\Omega_m + R_a \cdot I_a + \Delta U_k \quad (2.26)$$

Po úpravě tedy dostaneme rovnici pro výpočet ΔU_k :

$$\Delta U_k = U - c\phi\Omega_m - R_a \cdot I_a = 440 - 1,439 \cdot 293 - 37,5 \cdot 0,489 = 0,0355 \quad (2.27)$$

$$= 35,5 \text{ mV}$$

Napětí na kartáči nyní vynásobíme s proudem kotvy a získáme ztráty na kartáči.

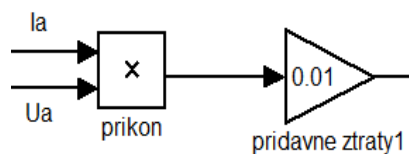


Obrázek 11: Výpočet ztrát na kartáči

Výsledné ztráty na kartáči tedy jsou:

$$\Delta P_k = 0,00355 \cdot 37,5 = 1,33 \text{ W} \quad (2.28)$$

Pro určení přídatných ztrát jsme použili blok Product, na který jsme přivedli napájecí napětí a proud kotvy. Tím jsme získali příkon motoru a pomocí bloku Gain s konstantou 0.01 máme výsledné přídatné ztráty motoru.



Obrázek 12: Přídatné ztráty motoru 1% příkonu

Přídatné ztráty tedy jsou:

$$\Delta P_{ad} = I_a \cdot U_a \cdot 0,01 = 37,5 \cdot 440 \cdot 0,01 = 165 \text{ W} \quad (2.29)$$

Pojmem ztráty naprázdno rozumíme součet ztrát v železe a mechanických ztrát. Určování ztrát v železe a mechanických ztrát je poměrně složitý proces, jelikož se jedná o ztráty vytvořené vířivými proudy, hysterezi, třením a ztráty vyvolané ventilátorem. Pro náš model postačí určit celkové ztráty v těchto obvodech a pomocí konstant je vyjádřit.

Nyní již známe hodnoty Jouleových ztrát, ztrát na kartáči, přídavných ztrát. Vypočítáme tedy hodnotu příkonu motoru:

$$P_p = U_a \cdot I_a = 440 \cdot 37,5 = 16\,500\,W \quad (2.30)$$

Celkové ztráty v motoru jsou tedy:

$$\Delta P = P_p - P = 16\,500 - 15\,000 = 1\,500\,W \quad (2.31)$$

Od celkových ztrát odečteme již známé ztráty:

$$\Delta P = \Delta P_J + \Delta P_{ad} + \Delta P_k + \Delta P_{me} + \Delta P_{fe} \quad (2.32)$$

$$1\,500 = 687,66 + 165 + 1,33 + \Delta P_{me} + \Delta P_{fe} \quad (2.33)$$

$$\Delta P_{me} + \Delta P_{fe} = 646\,W \quad (2.34)$$

Zjistili jsme, že součet mechanických ztrát a ztrát v železe činí 646 W. Pro zjednodušení si tedy určíme, že mechanické ztráty tvoří 480 W a ztráty v železe 166 W.

Ztráty v železe tvoří ztráty vířivých proudů a hysterezní ztráty. Určíme si, že hysterezní ztráty tvoří 66 W, a ztráty ve vířivých proudech 100 W. Při určení těchto hodnot si můžeme zavést do modelu konstanty, jež nám zaručí změnu hodnot ztrát při změně úhlové rychlosti. Pro hysterezní ztráty zavedeme následující vztah a konstantu:

$$\Delta P_{hys} = \Omega_m \cdot k_{hys} \quad (2.35)$$

$$66 = 293 \cdot k_{hys} \quad (2.36)$$

$$k_{hys} = 0,225 \quad (2.37)$$

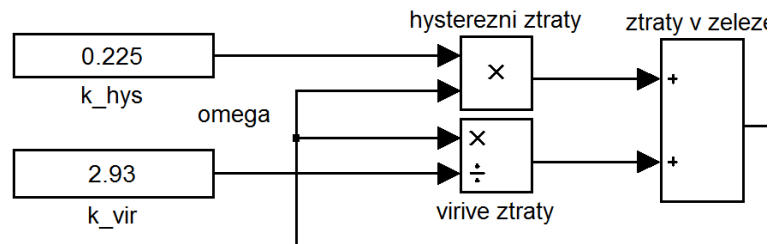
Pro ztráty ve vířivých proudech zavedeme následující vztah:

$$\Delta P_{vir} = \Omega_m / k_{vir} \quad (2.38)$$

$$100 = 293 / k_{vir} \quad (2.39)$$

$$k_{vir} = 2,93 \quad (2.40)$$

Pomocí bloku Product, Constant a Divide nasimulujeme a začleníme do našeho modelu.



Obrázek 13: Výpočet ztrát v železe pomocí Matlab-Simulink

Podobným způsobem určíme mechanické ztráty. Již víme, že součet mechanických ztrát je 480W. Rozdělíme si tedy mechanické ztráty na ventilační ztráty, které budou tvořit 280W a ventilační ztráty zbylých 200W. Pro ventilační ztráty zavedeme následující vztah a konstantu.

$$\Delta P_{ven} = \Omega_m \cdot k_{ven} \quad (2.41)$$

$$200 = 293 \cdot k_{ven} \quad (2.42)$$

$$k_{ven} = 0,683 \quad (2.43)$$

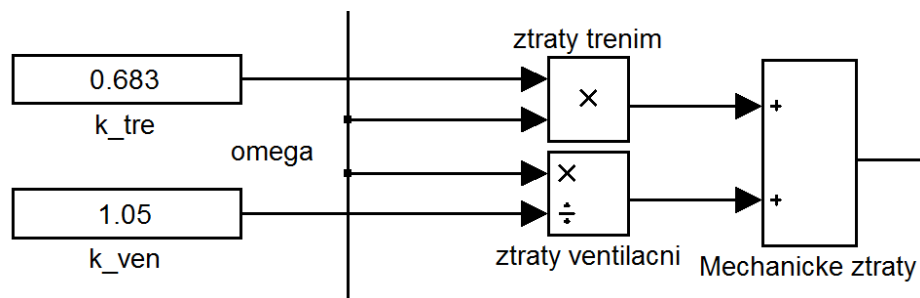
Konstantu pro ventilační ztráty již známe, zbývá nám tedy určit konstantu a vztah pro ztráty způsobené třením.

$$\Delta P_{tre} = \Omega_m / k_{tre} \quad (2.44)$$

$$280 = 293 / k_{tre} \quad (2.45)$$

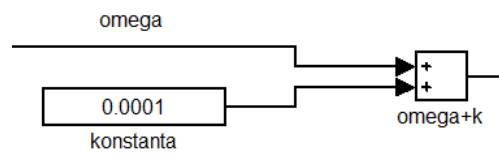
$$k_{tre} = 1,05 \quad (2.46)$$

Rovnice zavedeme do našeho modelu pomocí bloku Constant, Product a Divide. Výsledné mechanické ztráty můžeme zobrazit pomocí bloku Scope.



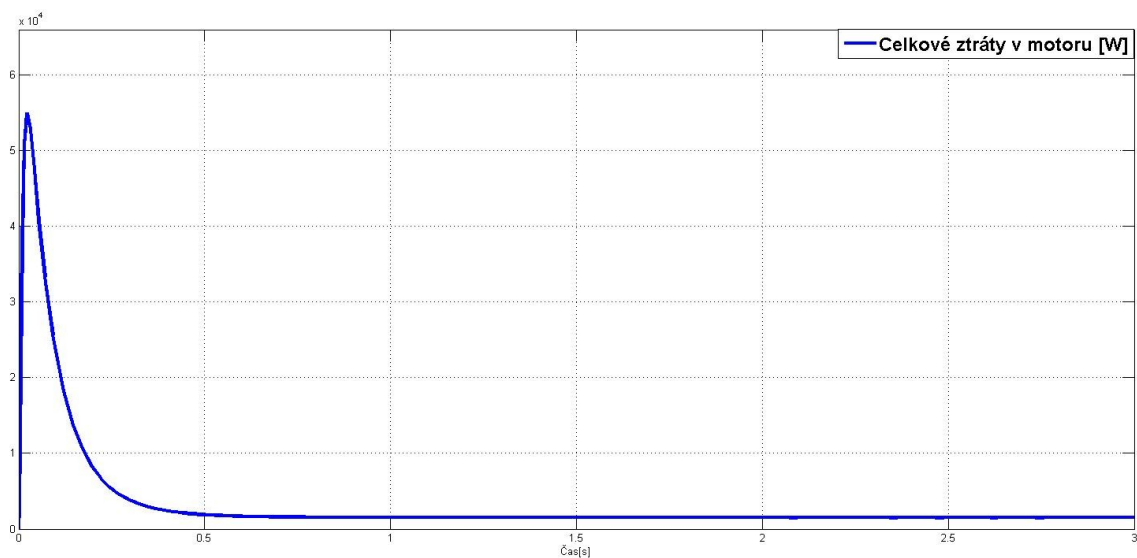
Obrázek 14: Výpočet mechanických ztrát pomocí Matlab-Simulink

Nyní už známe všechny proměnné a můžeme určit celkové ztráty naprázdno. Pomocí bloku Sum s názvem „m ztraty“ sečteme ztráty v železe a mechanické ztráty. Jelikož potřebujeme získat moment ztrát a ten následně odečíst od momentu motoru, musíme ztráty naprázdno vydělit úhlovou rychlostí. Tento krok provedeme pomocí bloku Divide. Při rozběhu motoru je počáteční úhlová rychlost nulová. Nastane tedy nežádoucí stav, a to dělení ztrát naprázdno nulou, tím pádem nemůže simulace dále pokračovat. Abychom zamezili dělení nulou při rozběhu motoru, přičteme pomocí bloku Sum velmi malou konstantu, která nám zaručí, že úhlová rychlost motoru bude vždy větší než 0.

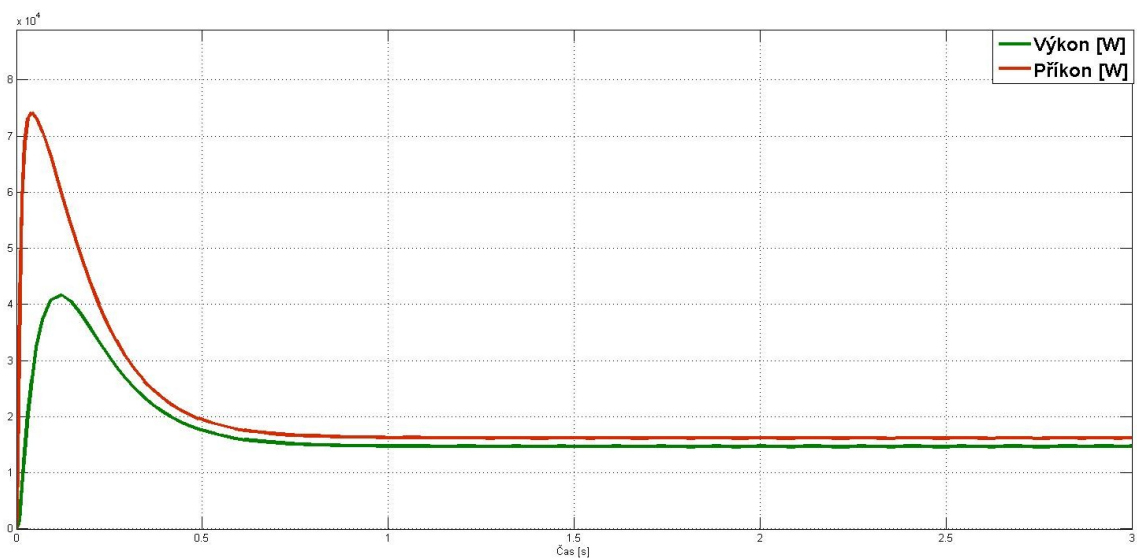


Obrázek 15: Podmínka pro $\Omega > 0$

Nyní přičteme ztráty k výkonu motoru a získáme příkon motoru. Případné rozdíly může způsobovat zaokrouhlení některých veličin. Přesné ztráty v motoru může určit pouze výrobce složitým měřením. Model stejnosměrného motoru s uvažováním ztrát je v příloze A. Subsystem ztrát v příloze B.



Obrázek 16: *Celkové ztráty v motoru*

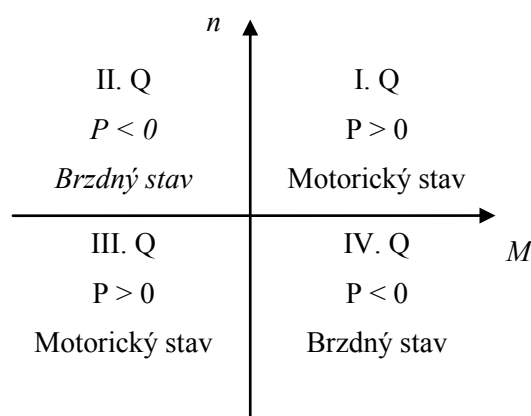


Obrázek 17: *Výkon a příkon stejnosměrného motoru*

3 Čtyřkvadrantový pulzní měnič

Pulzní měniče se využívají k řízení střední hodnoty stejnosměrného napětí. Jsou vhodné pro napájení a řízení stejnosměrných motorů. Konstrukce pulzního měniče je stejná jako u nepřímého měniče kmitočtu, pouze s tím rozdílem, že koncový H-můstek plní funkci regulátoru napětí. Ten je řízen pulzně-šířkovým modulátorem a umožňuje reverzaci chodu motoru.

Řízení stejnosměrného motoru je rozděleno do čtyř pracovních kvadrantů, ty protínají dvě navzájem kolmé osy. Vodorovná osa nám určuje moment motoru a svislá otáčky motoru. Rozložení je na obrázku 18.

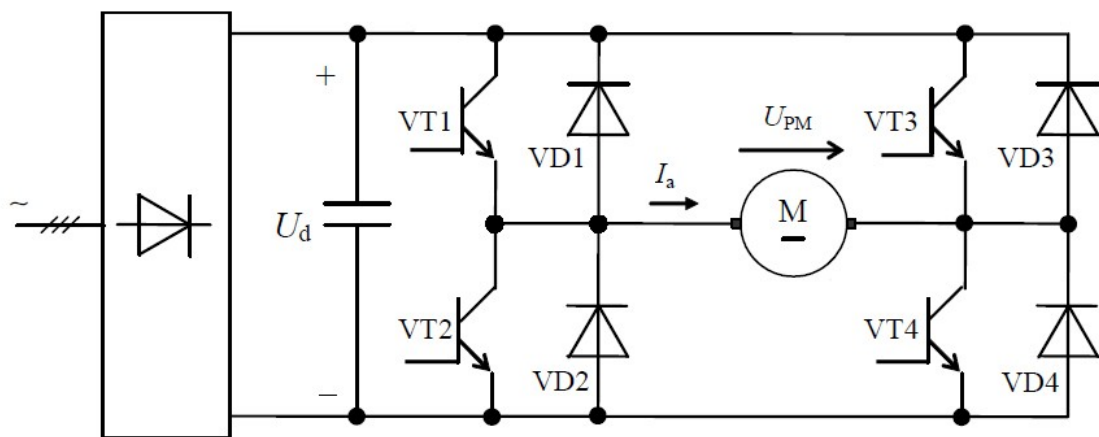


Obrázek 18: Pracovní kvadranty motoru [7]

Při použití jednokvadrantového měniče může být pouze jeden směr proudu a napětí. Dvoukvadrantový měnič dovoluje měnit polaritu napětí při stejném směru proudu (I.Q, IV.Q), popřípadě při stejné polaritě napětí mění směr proudu (I.Q, II.Q). Čtyřkvadrantový měnič může měnit polaritu výstupního napětí a zároveň směr výstupního proudu.

3.1 Princip činnosti

Typické zapojení čtyřkvadrantového měniče je na obrázku 19. Pomocí neřízeného šestipulzního usměrňovače je třífázové síťové napájení usměrněno. Následuje stejnosměrný meziobvod s kondenzátorem, stejnosměrné napětí se dále přivádí na vstup pulzního měniče.



Obrázek 19: Čtyřkvadrantový pulzní měnič [6]

Pro dosažení dobrých dynamických vlastností je pulzní měnič řízen spínacím kmitočtem v řádu jednotek kHz až desítek kHz. Existují dva způsoby řízení, bipolární a unipolární. Při bipolárním řízení se na kotvu motoru přivádí napětí obou polarit. Při unipolárním spínání se přivádí napětí pouze jedné polarity.

3.2 Ztráty

Pulzní měnič je tvořen z polovodičových součástek, na kterých vznikají v důsledku častého spínání ztráty. Velikost ztrát je dána konstrukcí daného měniče. Určit přesné ztráty při různých stavech může jen výrobce pomocí náročných měření a analýz. Pro náš projekt postačí určit ztráty na základě odborného odhadu a zjednodušených závislostí na určitých parametrech. Celkové ztráty v měniči tvoří:

$$\Delta P_{PM} = \Delta P_S + \Delta P_V + \Delta P_P + \Delta P_R + \Delta P_K \quad (3.1)$$

3.2.1 Ztráty na spínacích součástkách

Velikost ztrát je závislá na napětí, proudu (spínací/vypínací) a frekvenci spínání součástky. Jelikož je závislost těchto veličin složitá, zjednodušíme si ji závislostmi lineárními.

$$\Delta P_S = \frac{f_{sp}}{f_{sp \text{ typ}}} \frac{U_d}{U_{d \text{ typ}}} \frac{I_M}{I_{M \text{ typ}}} \Delta P_{1f \text{ typ}} \quad (3.2)$$

kde f_{sp} je nosná frekvence pulzně-širokové modulace, $f_{sp\ typ}$ typová nosná frekvence, U_d napětí v meziobvodu, I_M proud motoru, typové hodnoty $U_{d\ typ}$ a $I_{M\ typ}$, při kterých známe $\Delta P_{1f\ typ}$. V našem modelu budeme uvažovat, že tyto ztráty tvoří 47% celkových ztrát.

3.2.2 Ztráty ve vodivých částech

Vznikají při průchodu proudu obvodem. Při určování ztrát budeme vycházet z předpokladu konstantního úbytku na součástkách, kterými proud prochází

$$\Delta P_V = k_P I_M \quad (3.3)$$

kde I_M je proud motoru a k_P je konstanta pro jmenovitý chod motoru. Tyto ztráty budou tvořit v našem případě 23% celkových ztrát.

3.2.3 Ztráty na polovodičových součástkách

Jedná se o ztráty na polovodičových součástkách (tyristor, tranzistor, dioda apod.), přes které prochází proud. Ztráty jsou závislé na zátěži, respektive na zatížení dané součástky. Přibližné ztráty polovodičové součástky představuje následující rovnice:

$$\Delta P_P = \Delta u_{P1} I_P + k_1 I_P^2 \quad (3.4)$$

kde Δu_{P1} je úbytek napětí na součástce, I_P procházející proud a k_1 konstanta dané součástky. Předpokládáme, že tvoří 20% celkových ztrát.

3.2.4 Ztráty v řídicím obvodu

Jedná se o ztráty nezávislé na zátěži, ale závislé na provedení a vybavení měniče. Velikost ztrát v řídicích obvodech je ve většině případů udávána výrobcem. Pro zjednodušení budeme uvažovat 5% z celkových ztrát v měniči.

3.2.5 Konstantní ztráty

Ztráty vzniklé v pomocných obvodech, ventilátorech a ostatních částech měniče. Pro značně velké množství proměnných budeme uvažovat tyto ztráty za konstantní, tedy zbylých 5% celkových ztrát. [9]

3.3 Matematický model pulzního měniče

Při modelování pulzních měničů předpokládáme následující zjednodušující předpoklady:

- 1) Ideální napájecí síť:
 - napájecí síť má nulovou impedanci
- 2) Polovodičové součástky jsou ideální:
 - v sepnutém stavu nulový odpor
 - v rozepnutém stavu nekonečně velký odpor
 - ideální komutace (okamžité spínání/rozepínání)
- 3) Nulová ochranná doba mezi vypnutím jednoho prvku a sepnutím druhého prvku ve větvi

Model pulzního měniče můžeme navrhnout dvěma odlišnými způsoby. V našem případě budeme vycházet ze středních hodnot výstupního stejnosměrného napětí. Přenosová rovnice pulzního měniče je:

$$F_{PM}(p) = \frac{U_s(p)}{U_R(p)} = K_{PM} e^{-pT_{PM}} \approx K_{PM} \frac{1}{1 + pT_{PM}} \quad (3.5)$$

konstanta K_{PM} je zesílení pulzního měniče, která není závislá na pracovním bodě (U_r).

$$K_{PM} = \frac{U_s}{U_r} = \frac{U_d}{U_r} \frac{U_r}{U_{p\max}} = \frac{U_d}{U_{p\max}} \quad (3.6)$$

kde U_d je stejnosměrné napětí přiváděné na měnič, $U_{p\max}$ je maximální napětí pilovitého (řídícího) signálu.

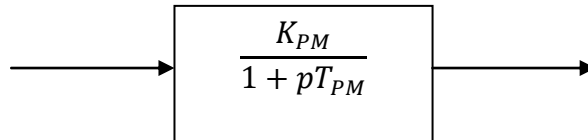
Frekvenci spínání výkonových prvků nám představuje časovou konstantu měniče

$$T_{PM} = \frac{1}{2f} = \frac{T}{2} \quad (3.7)$$

Výstupní hodnota středního stejnosměrného napětí je tedy definována jako řídicí napětí vynásobené konstantou zesílení pulzního měniče, tedy:

$$U_s = U_d \frac{U_r}{U_{p\max}} = K_{PM} U_r \quad (3.8)$$

V programu Matlab-Simulink zavedeme model pulzního měniče pomocí bloku Transfer Fcn. Do čitatele zadáme hodnotu zesílení K_{PM} a ve jmenovateli hodnotu jedna plus časovou konstantu měniče. Viz. obrázek číslo 20. [6]



Obrázek 20: *Blokové schéma pulzního měniče*

3.4 Simulační model pulzního měniče s uvažováním ztrát

Nejprve si vypočítáme usměrněné napětí, které nám vstupuje do měniče. Soustava je napájena z třífázové sítě a pomocí šestipulzního usměrňovače usměrněna.

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_s = 1,35 \cdot U_s = 1,35 \cdot 400 = 540 \text{ V} \quad (3.9)$$

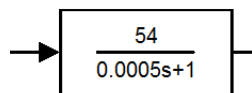
Nyní si určíme řídicí napětí. Většinou se k řízení pulzních měničů využívá pilovitý signál s max. amplitudou 10V. Zesílení pulzního měniče bude tedy

$$K_{PM} = \frac{U_d}{U_{p\max}} = \frac{540}{10} = 54 \quad (3.10)$$

Spínací frekvence se běžně pohybují v řádech jednotek kHz až desítek kHz. Pro náš model si určíme spínací frekvenci 1kHz. Časovou konstantu vypočítáme podle vzorce:

$$T_{PM} = \frac{1}{2f} = \frac{1}{2 \cdot 1000} = 0.0005 = 500 \mu s \quad (3.11)$$

Nyní už máme vše potřebné a můžeme naše hodnoty zadat do bloku Transfer Fcn. Výsledný model bude vypadat následovně.



Obrázek 21: Blok Transfer Fcn pro pulzní měnič

Určení ztrát v měniči je komplikovaný proces. V praxi se nejčastěji používá řídicí jednotka, která obsahuje usměrňovač, pulzní měnič, řídicí obvody apod. Výrobce udává celkovou účinnost jednotky. Musíme tedy vycházet částečně s odborným odhadem ztrát v celé jednotce. Účinnost jednotek je většinou okolo 0,975. Vypočítáme si celkové ztráty v jednotce a to podle následujícího vztahu:

$$\Delta P_{typ} = \frac{1 - \eta_{typ}}{\eta_{typ}} \frac{P_{MN}}{\eta_{MN}} = \frac{1 - 0,975}{0,975} \frac{15000}{0,9090} = 423 \text{ W} \quad (3.12)$$

kde η_{typ} je účinnost jednotky, P_{MN} jmenovitý výkon motoru a η_{MN} je účinnost motoru.

Nyní máme určeny celkové ztráty jednotky. Rozdělíme je mezi dílčí obvody v jednotce, a to v poměru 60% pulzní měnič, 22% neřízený šestipulzní usměrňovač a 18% ostatní ztráty. Po přepočítání vychází celkové ztráty v měniči na 254 W. Při rozložení ztrát v měniči vycházíme z následující tabulky:

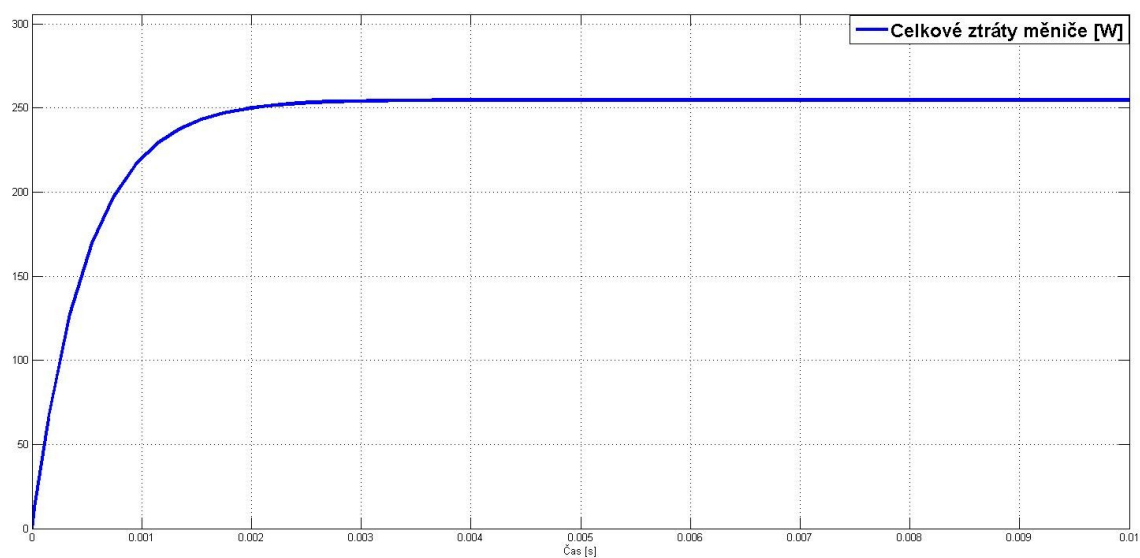
ΔP_S - Ztráty na spínacích součástkách	47%	119 W
ΔP_V - Ztráty ve vodivých částech	23%	58 W
ΔP_P - Ztráty na polovodičových součástkách	20%	51 W
ΔP_R - Ztráty v řídicím obvodu	5%	13 W
ΔP_K - Konstantní ztráty	5%	13 W
ΔP_{PM} - Celkové ztráty	100%	254 W

Tabulka č.2: Rozložení ztrát v měniči

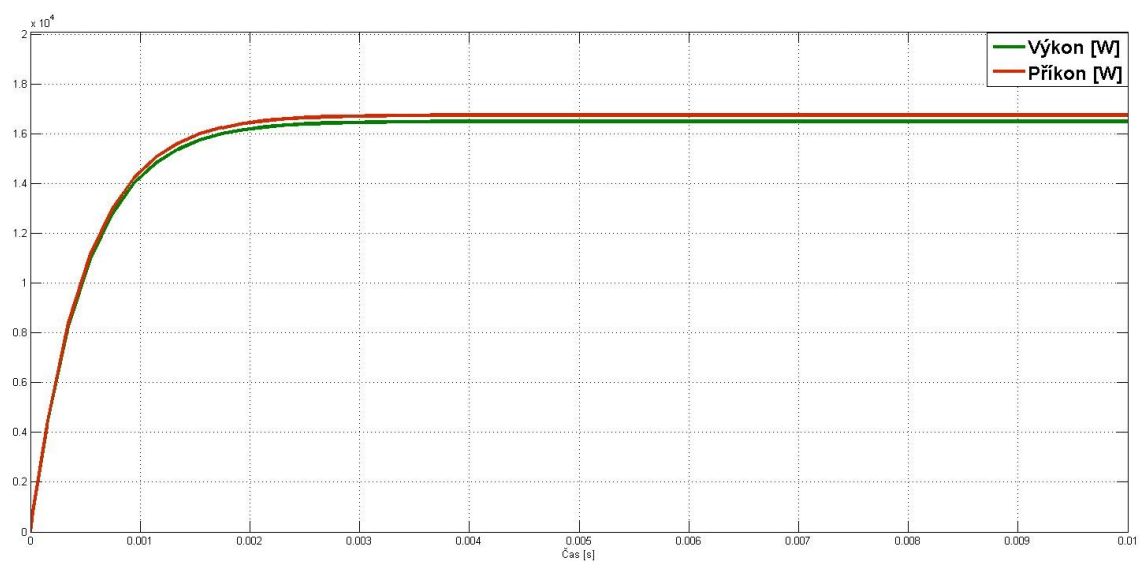
Určíme výkon měniče pomocí proudu a napětí. Výslednou hodnotu vynásobíme opačnou hodnotou účinnosti měniče, tím získáme příkon měniče. Účinnost samotného měniče bude:

$$\eta_{PM} = \frac{P_{PM}}{P_{PM} + \Delta P_{PM}} = \frac{16500}{16500 + 254} = 0,985 \quad (3.13)$$

Výkon odečteme od příkonu. Tím získáme ztráty v měniči. Následuje rozdělení ztrát pomocí bloku Gain podle tabulky 3.2. Vypočítané hodnoty se mírně liší od simulačních hodnot. To je způsobeno zaokrouhlením hodnot. Simulační schéma je uvedeno v příloze C.



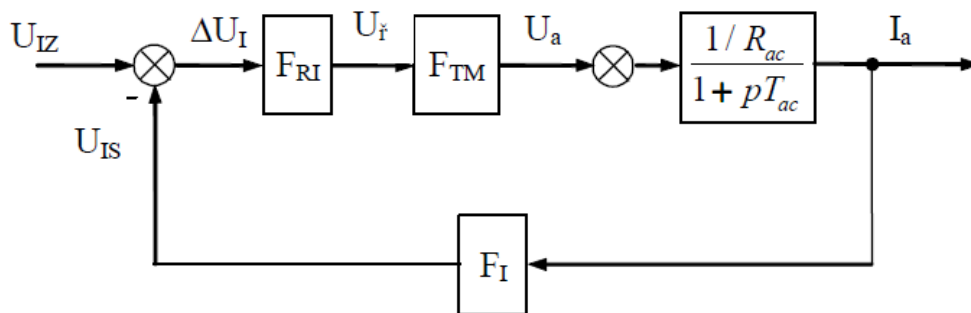
Obrázek 22: Ztráty v pulzním měniči



Obrázek 23: Výkon a příkon pulzního měniče

4 Simulační ověření rychlostní regulace DC pohonu s pulzním měničem

Pro ověření rychlostní regulace musíme náš model rozšířit o regulátor rychlosti s podřazenou smyčkou proudu. Na vstup regulátoru rychlosti přivádíme žádanou hodnotu rychlosti, od které se odečte aktuální hodnota rychlosti. Vzniklou odchylku zpracovává regulátor rychlosti, tvořen nejčastěji PI regulátorem. Výstupem regulátoru je žádaná hodnota proudu. Od žádané hodnoty proudu se opět odečte skutečná hodnota proudu. Výslednou odchylku zpracovává regulátor proudu, opět PI regulátor. Výstupem regulátoru proudu je řídicí napětí přiváděné na pulzní měniče. Řídicí napětí je úměrné na výstupu měniče. Zjednodušené blokové schéma regulátoru proudu vidíme na následujícím obrázku.



Obrázek 24: Blokové schéma regulace proudu [10]

Parametry čidla proudu: $K_I = 1$, $\tau_i = 1\text{ms}$. Určíme zesílení, malou časovou konstantu proudového obvodu a přenos soustavy.

$$K_{SI} = K_{TM} \cdot \frac{1}{R_{ac}} \cdot K_I = 54 \cdot 0,833 \cdot 1 = 44,98 \quad (4.1)$$

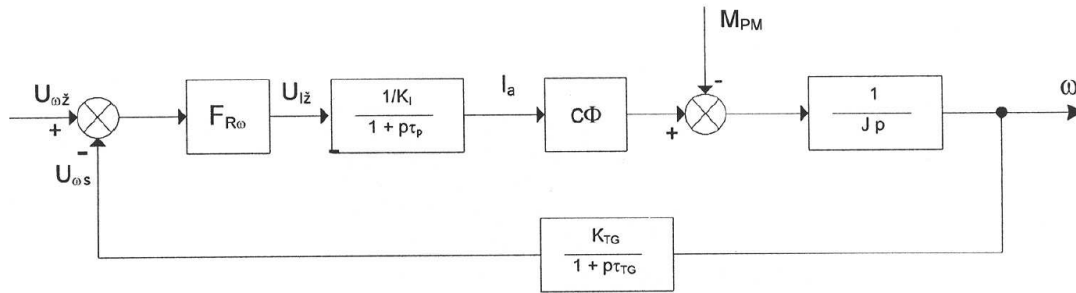
$$\tau_{\sigma i} = T_{TM} + T_I = 0,0005 + 0,001 = 0,0015 = 1,5\text{ ms} \quad (4.2)$$

$$F_{SI} = \frac{K_{SI}}{(1 + pT_{ac})(1 + pT_{\sigma i})} = \frac{44,98}{(1 + p0,007)(1 + p0,0015)} \quad (4.3)$$

Podle metody optimálního modulu (OM) vychází PI regulátor s přenosem

$$F_{RI} = K_{RI} \frac{(1 + pT_{RI})}{pT_{RI}} = \frac{T_{ac}}{2K_{SI}\tau_{\sigma I}} \frac{(1 + pT_{ac})}{pT_{ac}} = 0,051 \frac{(1 + p0,007)}{p0,007} \quad (4.4)$$

Pro výpočet regulátoru rychlosti použijeme následující blokové schéma.



Obrázek 25: Zjednodušené blokové schéma regulace rychlosti s podřazenou proudovou smyčkou [10]

Podřazenou proudovou smyčku aproximujeme na setrvačný člen, kde součet časových konstant (τ_{TM} - časová konstanta pulzního měniče, τ_I - časová konstanta čidla proudu) vynásobíme 4, podle metody symetrického optima (SO).

$$F_{KI} = \frac{1/K_I}{1 + p\tau_p} = \frac{1}{1 + p4 \cdot (0,0005 + 0,001)} = \frac{1}{1 + p0,006} \quad (4.5)$$

Parametry čidla rychlosti: $K_{TG} = 1, \tau_{TG} = 1ms$. Určíme zesílení soustavy, součet malých časových konstant a přenos soustavy.

$$K_S = \frac{1}{K_I} \frac{c\phi}{J} K_{TG} = \frac{1 \cdot 1,439 \cdot 1}{1 \cdot 0,24} = 6 \quad (4.6)$$

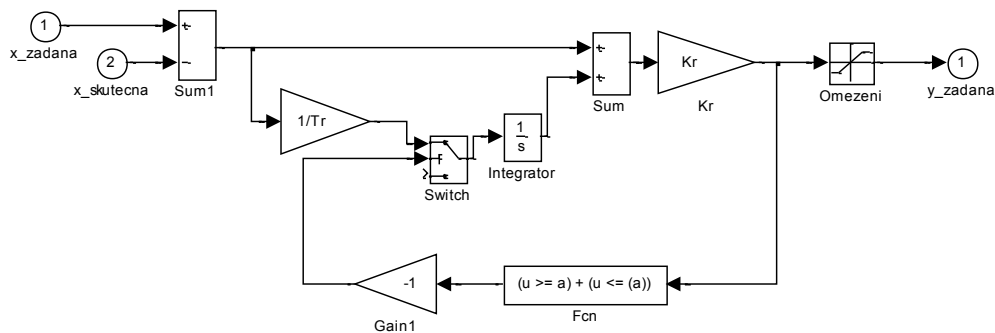
$$\tau_{\sigma\omega} = \tau_p + \tau_{TG} = 0,006 + 0,001 = 0,007 = 7 ms \quad (4.7)$$

$$F_{S\omega}(p) = \frac{1/K_I}{1 + p\tau_p} \frac{c\phi}{pJ} \frac{K_{TG}}{(1 + p\tau_{TG})} = \frac{K_S}{p(1 + p\tau_{\sigma\omega})} \quad (4.8)$$

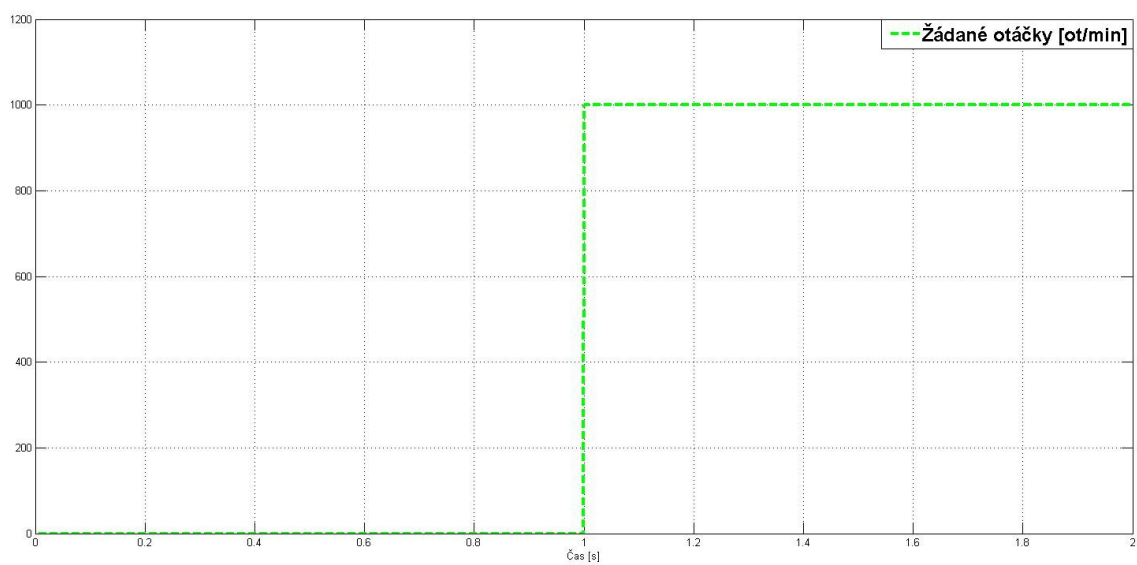
Vše potřebné již známe a můžeme sestavit regulátor rychlosti. Vycházíme z metody symetrického optima (SO). Výsledný PI regulátor bude mít následující hodnoty:

$$F_{R\omega}(p) = \frac{F_{0\omega}(p)}{F_{S\omega}(p)} = \frac{1}{2K_{S\omega}\tau_{\sigma\omega}} \frac{(1 + p20\tau_{\sigma\omega})}{p20\tau_{\sigma\omega}} = 11,9 \frac{(1 + p0,14)}{p0,14} \quad (4.9)$$

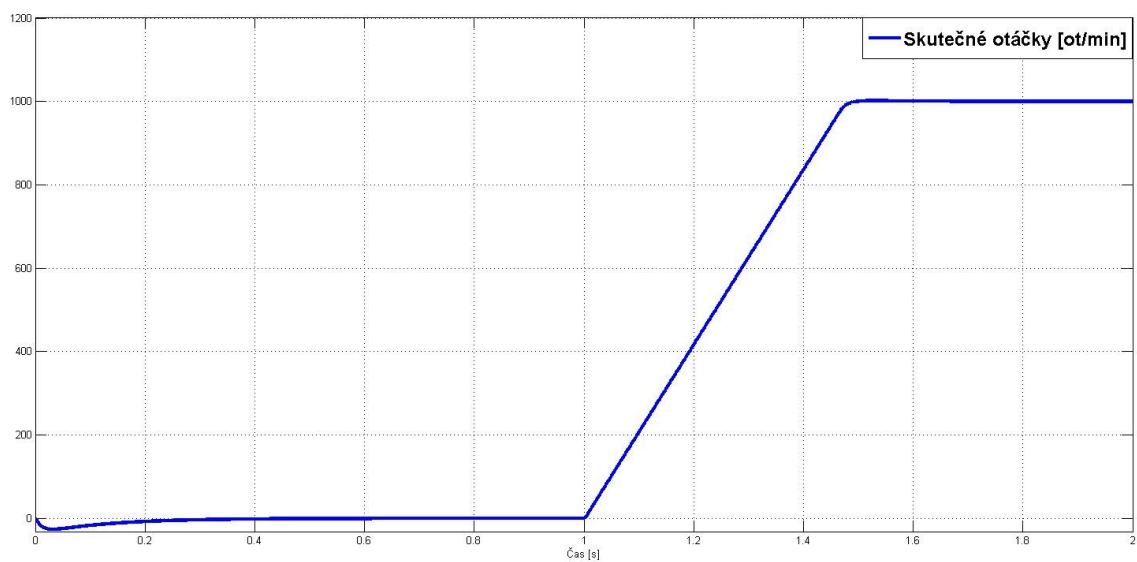
Hodnoty zesílení a časové konstanty zadáme do PI regulátoru. Simulační model PI regulátoru mi poskytl vedoucí práce. V modelu lze nastavit omezení výstupní hodnoty. V případě výstupu regulátoru rychlosti budeme uvažovat omezení na dvojnásobek jmenovité hodnoty proudu motoru, tedy 75 A. U regulátoru proudu omezíme výstupní hodnotu na 8,15 V, což nám v případě maximálního výstupního napětí zaručí jmenovitou hodnotu napájecího napětí motoru. Pro ověření vypočítaných hodnot PI regulátorů zadáme vstupní signál (požadovanou rychlost) ve tvaru jednotkového skoku. Simulační model rychlostní regulace je v příloze D. [10]



Obrázek 26: Simulační model PI regulátoru



Obrázek 27: *Ověření rychlostní regulace – žádané otáčky*



Obrázek 28: *Ověření rychlostní regulace – skutečné otáčky*

5 Analýza poměrů a dimenzování brzdné jednotky pro vybrané situace pohonu

Základní model stejnosměrného motoru řízený pulzním měničem s uvažováním ztrát máme hotový. Nyní náš model prověříme na situace, které by mohly v praxi nastat. Motory se běžně používají jako pohon například nákladního výtahu. Simulační průběh určíme tak, aby model otestoval na režim spouštění a zvedání. Z důvodu velkých otáček motoru, zavedeme do simulačního modelu převodovku s převodovým poměrem $i=20$, průměrem lanového bubnu $d=0,2$ m a účinností převodovky $\eta_P=0,92$. Zavedením převodovky musíme v modelu změnit celkový moment setrvačnosti motoru a moment zátěže pro režim zvedání a spouštění.

Vypočítáme si hmotnost nákladu pro jmenovitý moment zátěže motoru, účinnost převodovky $\eta_P=1$.

$$M_M = m \cdot g \cdot 0,5 \cdot d \cdot \frac{1}{i \cdot \eta_P} \quad (5.1)$$

Po úpravě dostaneme rovnici:

$$m = \frac{M_M \cdot i \cdot \eta_P}{g \cdot 0,5 \cdot d} = \frac{54 \cdot 20 \cdot 1}{9,8 \cdot 0,5 \cdot 0,2} = 1102 \text{ kg} \quad (5.2)$$

Při změně hmotnosti plošiny musíme změnit nastavení PI regulátorů, momentu zátěže a celkový moment setrvačnosti. Simulační průběh bude mít periodu 26s. Prvních 10s se plošina zvedá (motorický stav motoru), následně se na 3s zastaví. Po krátké pauze se plošina začne 10s spouštět, a následně se opět na 3s zastaví. Simulační model prověříme na následujících situacích.

	Hmotnost plošiny [kg]	Otáčky n_n [ot/min]
Situace 1	$m = 1102 \text{ kg}$	$n = 2800 \text{ ot/min}$
Situace 2	$m = 1102 \text{ kg}$	$n/2 = 1400 \text{ ot/min}$
Situace 3	$m/2 = 551 \text{ kg}$	$n = 2800 \text{ ot/min}$
Situace 4	$m/2 = 551 \text{ kg}$	$n/2 = 1400 \text{ ot/min}$

Tabulka č.3: *Tabulka simulačních hodnot*

Situace 1 – $m = 1102 \text{ kg}, n = 2800 \text{ ot/min}$,

Regulátor otáček typu PI: zesílení $K_{R\omega} = 13,5$

Moment zátěže pro zvedání plošiny:

$$M_{PM} = m \cdot g \cdot 0,5 \cdot d \cdot \frac{1}{i \cdot \eta_p} = 1102 \cdot 9,8 \cdot 0,5 \cdot 0,2 \cdot \frac{1}{20 \cdot 0,92} = 58,7 \text{ Nm} \quad (5.3)$$

Moment zátěže pro spouštění plošiny:

$$M_{PM}' = m \cdot g \cdot 0,5 \cdot d \cdot \frac{\eta_p}{i} = 1102 \cdot 9,8 \cdot 0,5 \cdot 0,2 \cdot \frac{0,92}{20} = 49,7 \text{ Nm} \quad (5.4)$$

Moment setrvačnosti pohonného mechanismu je dán vztahem:

$$J_{PM} = m \left(\frac{d}{2} \right)^2 = 1102 \cdot \left(\frac{0,2}{2} \right)^2 = 11 \text{ Nm} \quad (5.5)$$

Pro určení celkového momentu setrvačnosti musíme výsledný moment pracovního mechanismu přepočítat na redukovaný moment.

$$J_{Red} = J_{PM} \frac{1}{i^2} = 11 \cdot \frac{1}{20^2} = 0,0275 = 27,5 \text{ mNm} \quad (5.6)$$

Celkový moment setrvačnosti je dán součtem momentu setrvačnosti motoru a redukovaného momentu motoru. [7]

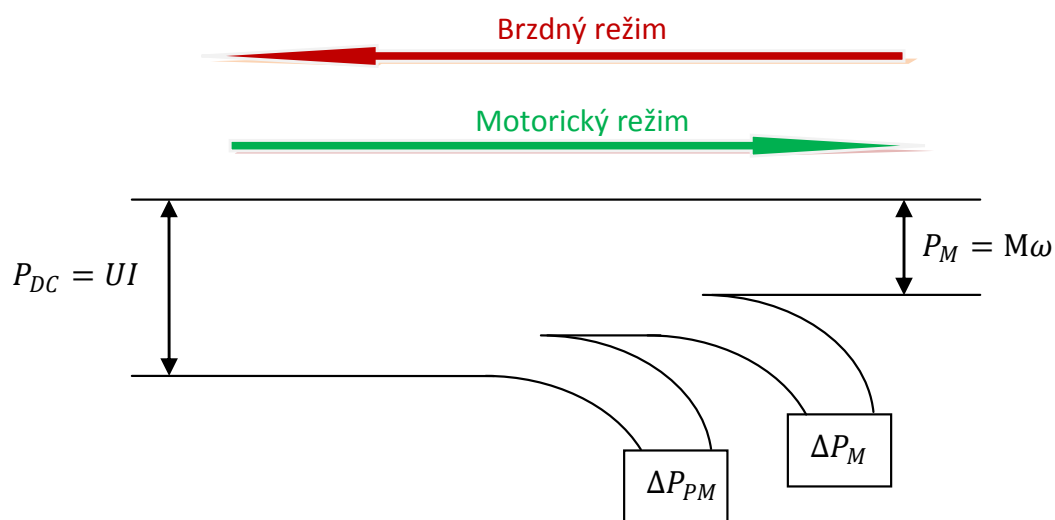
$$J_c = J_{Red} + J_M = 0,0275 + 0,24 = 0,27 \text{ Nm} \quad (5.7)$$

Pro dimenzování brzdě jednotky musíme určit výkon ve stejnosměrném obvodu. Velikost výkonu se odvíjí od režimu stejnosměrného motoru. Při zvedání plošiny (motorický stav motoru) je výkon v meziobvodu dán jako:

$$P_{DC} = P_M + \Delta P_M + \Delta P_{PM} \quad (5.8)$$

Při spouštění plošiny se od výkonu motoru odečítají ztráty v motoru a ztráty v měniči:

$$P_{DC}' = P_M - \Delta P_M - \Delta P_{PM} \quad (5.9)$$

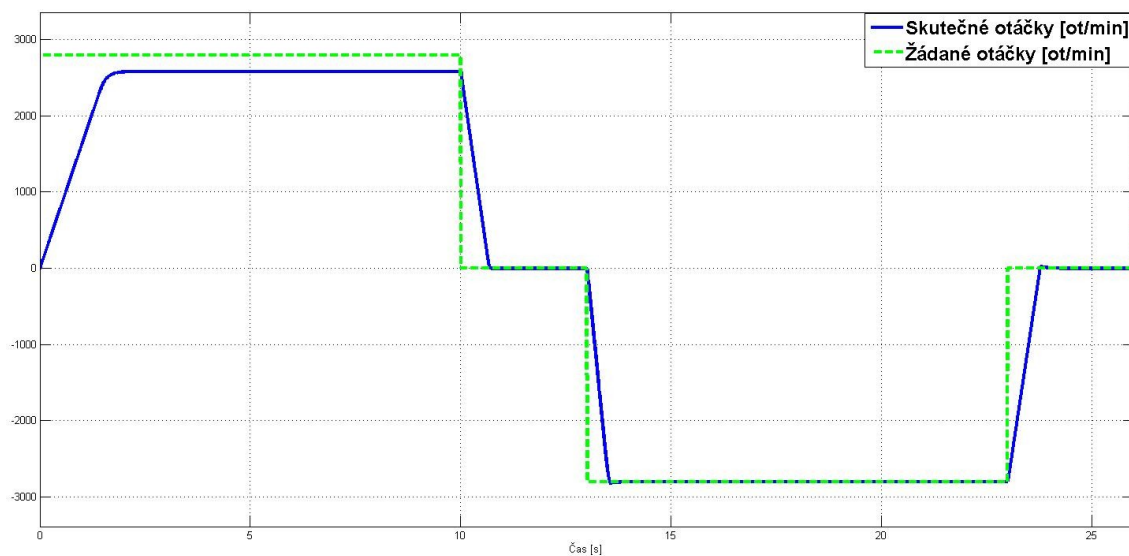


Obrázek 29: Výkonová bilance simulačního modelu

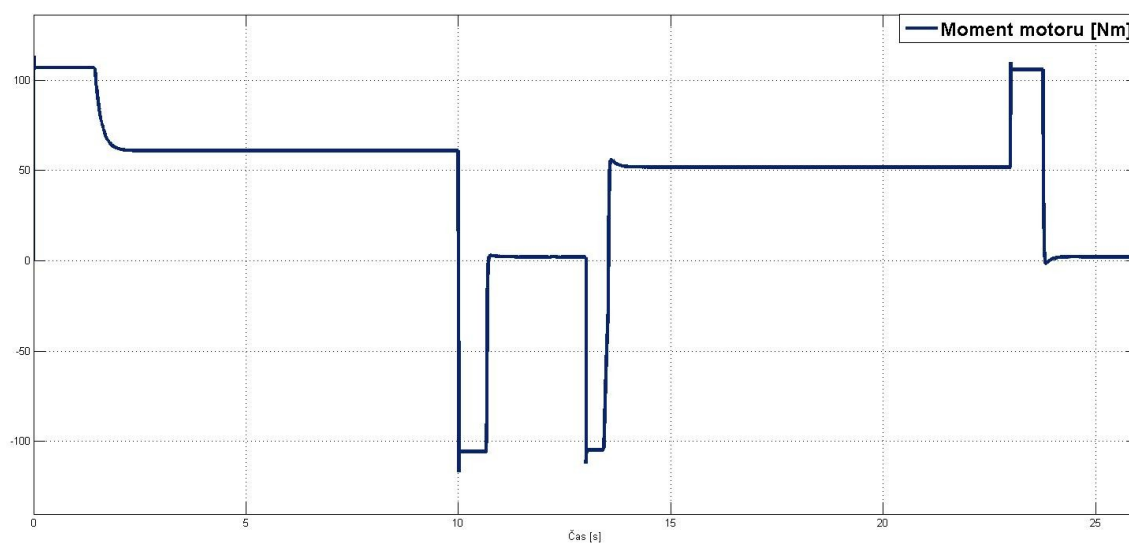
Do simulačního modelu přidáme blok Embedded MATLAB Function, jako vstupní proměnné zadáme výkon motoru, ztráty v motoru a ztráty v měniči. Do bloku zadáme kód:

```
function PDC = fcn(Pm,P1,P2)
if Pm>0;
PDC=Pm+P1+P2;
else PDC=Pm-P1-P2;
end
```

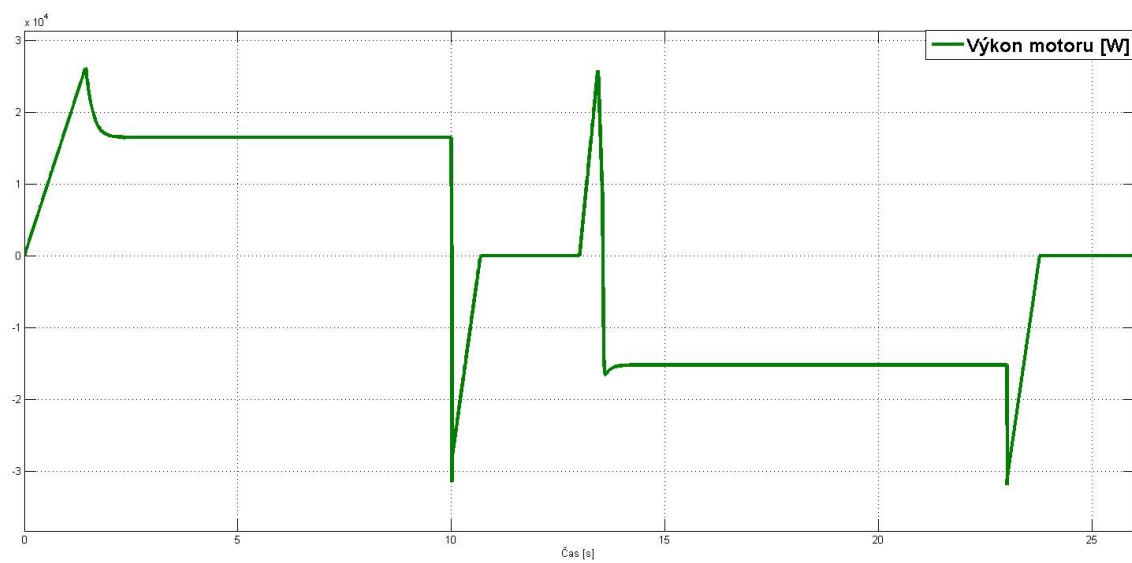
Blok vyhodnotí, zda motor pracuje v motorickém nebo generátorickém režimu. Na výstupu PDC je výsledný výkon v meziobvodu.



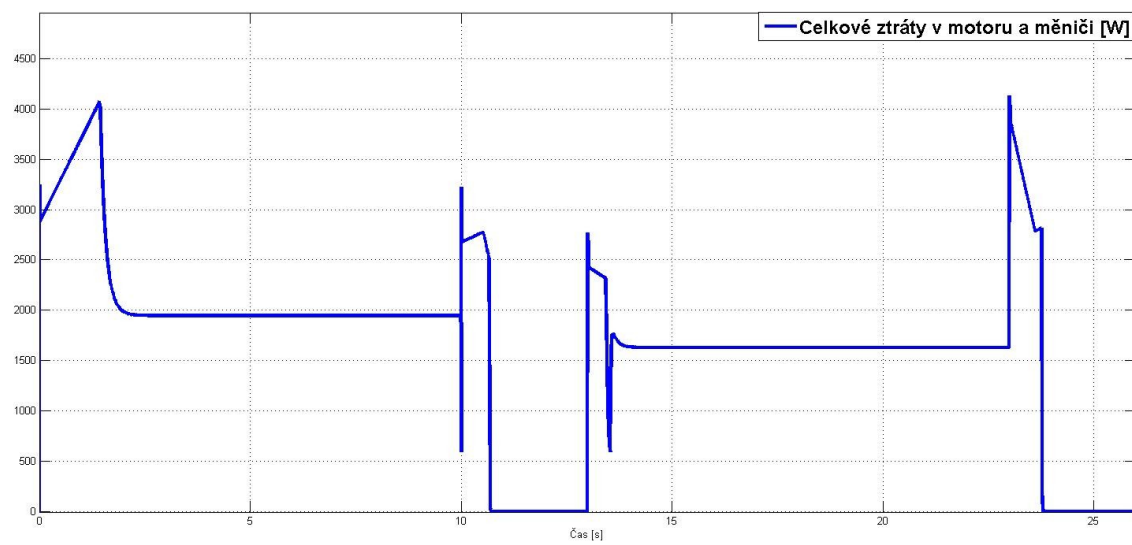
Obrázek 30: *Žádané a skutečné otáčky motoru*



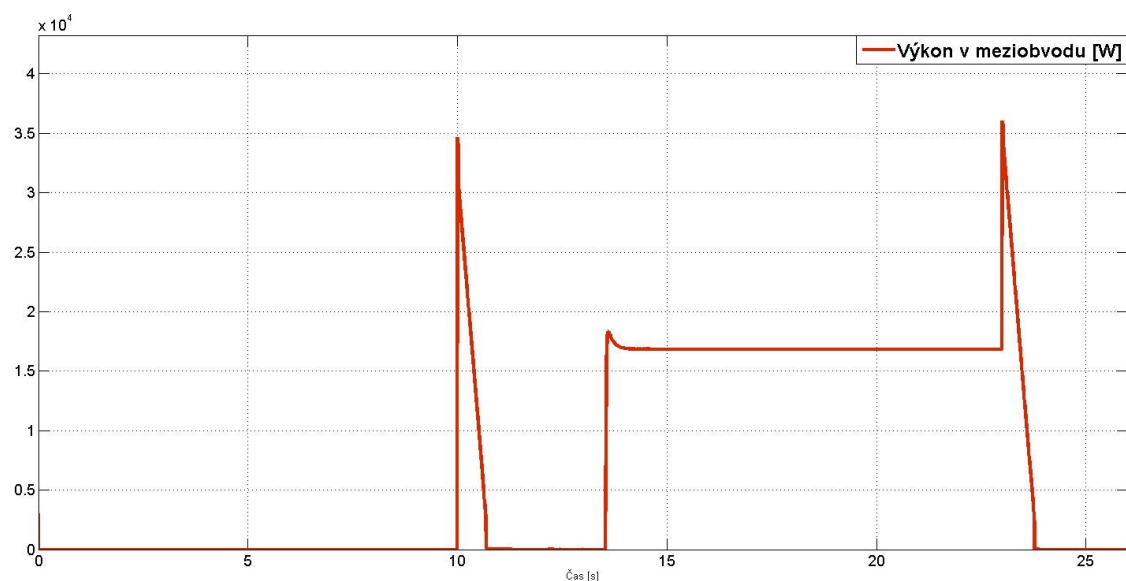
Obrázek 31: *Moment motoru*



Obrázek 32: Výkon motoru



Obrázek 33: Součet ztrát $\Delta P_M + \Delta P_{PM}$

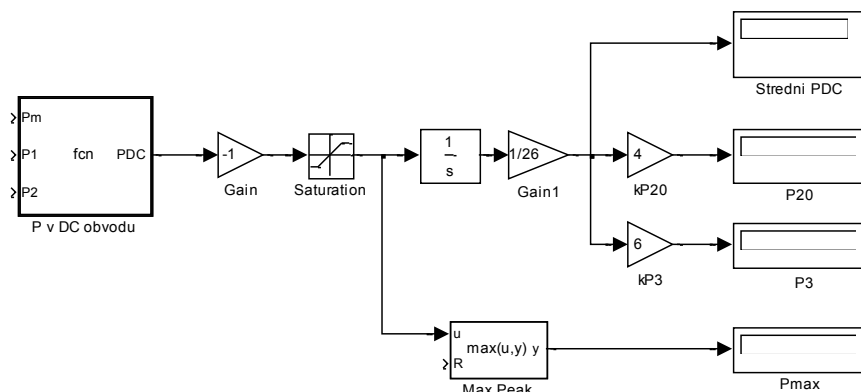


Obrázek 34: Výkon v meziobvodu při brzdění

Výrobce Siemens dimenzuje brzdné jednotky podle hodnoty P20. Tato hodnota uvádí přípustný špičkový výkon po dobu 20s. Hodnota P20 je čtyřnásobek střední hodnoty výkonu v meziobvodu. Střední hodnota výkonu v meziobvodu je dána vztahem:

$$P_{DCstř} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{dc}(t) dt \quad (5.10)$$

V simulačním modelu se $P_{DCstř}$ určí tak, že výsledný průběh výkonu v meziobvodu invertujeme pomocí bloku Gain s hodnotou -1. Průběh omezíme pouze na kladnou hodnotu pomocí bloku Saturation. Vložíme blok Transfer fcn a Gain s hodnotou 1/26. Pomocí bloku Display zobrazíme střední hodnotu výkonu.



Obrázek 35: Výpočet střední hodnoty výkonu v meziobvodu

Pro správné dimenzování jednotky musíme znát maximální hodnotu výkonu v meziobvodu, ta musí být menší než 1,5 násobek hodnoty P20. Kompletní simulační model je v příloze E.

$$P_{DCstř} = 7128 \text{ W}$$

$$P_{20} = 28,5 \text{ kW}$$

$$P_3 = 42,8 \text{ kW}$$

$$P_{\max} = 36 \text{ kW}$$

Navrhovaná brzdná jednotka: Siemens 6SE7028-0EA87-2DA0

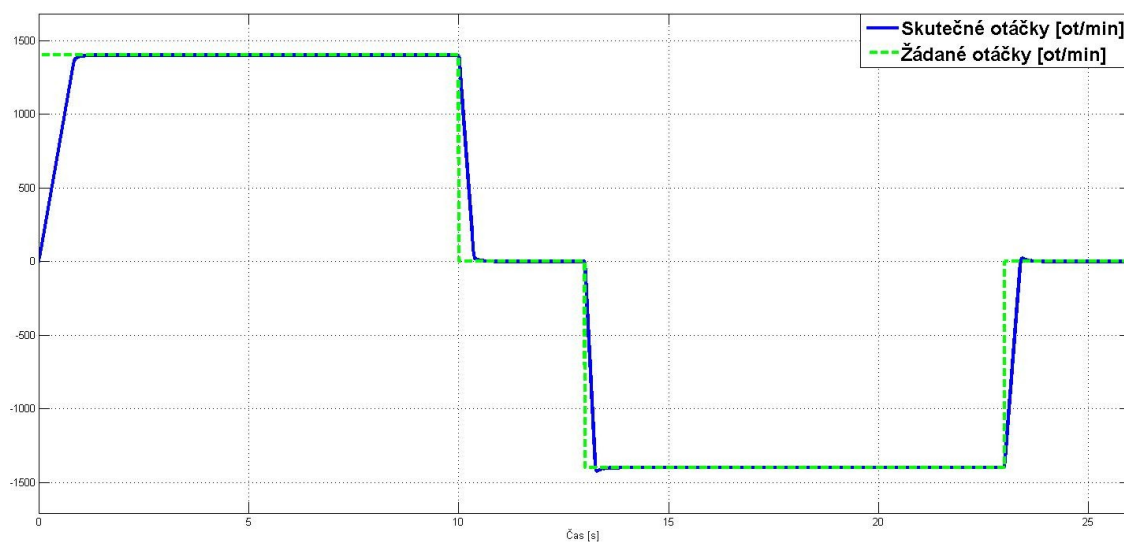
Externí brzdový odpor: 28-0ES87-2DC0 8 Ω

Na průběhu otáček vidíme, že výstupní hodnota regulátoru proudu je při zvedání omezena. Není možné dosáhnout požadovaných otáček motoru bez přetížení. Hodnota P20 odpovídá 28,5 kW. Hodnota P3 je větší než maximální hodnota výkonu v meziobvodu. Vhodná jednotka pro danou situaci je od společnosti Siemens s označením 6SE7028-0EA87-2DA0, která je dimenzována na hodnotu P20 50 kW. K jednotce je nutné připojit externí odpor hodnoty 8 Ω s označením 28-0ES87-2DC0.

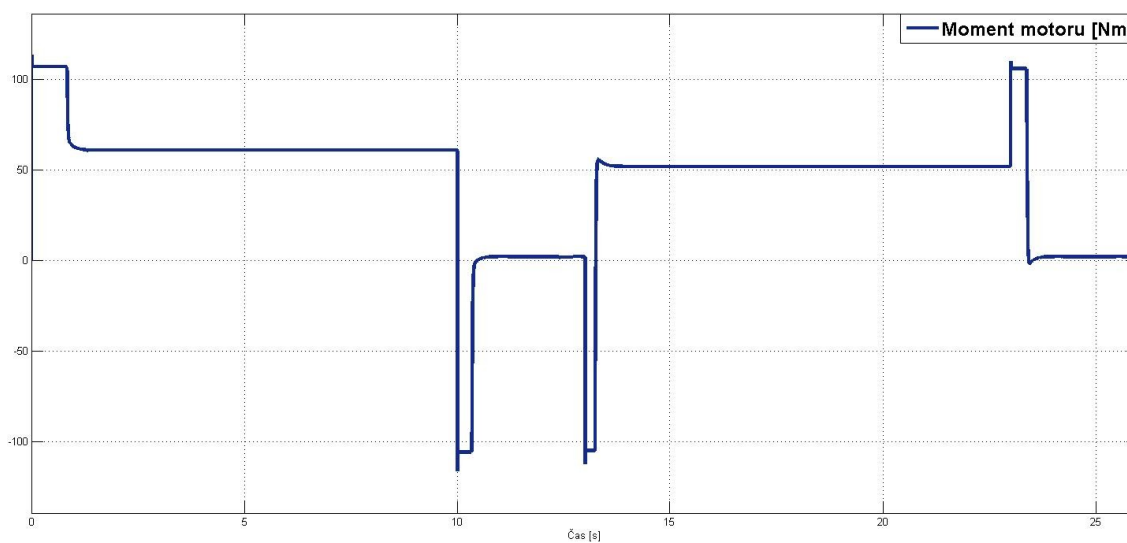
Situace 2

$m = 1102 \text{ kg}$, $n = 1400 \text{ ot/min}$, $M_{PM} = 58,7 \text{ Nm}$, $M_{PM}' = 49,7 \text{ Nm}$, $J_c = 0,27 \text{ Nm}$

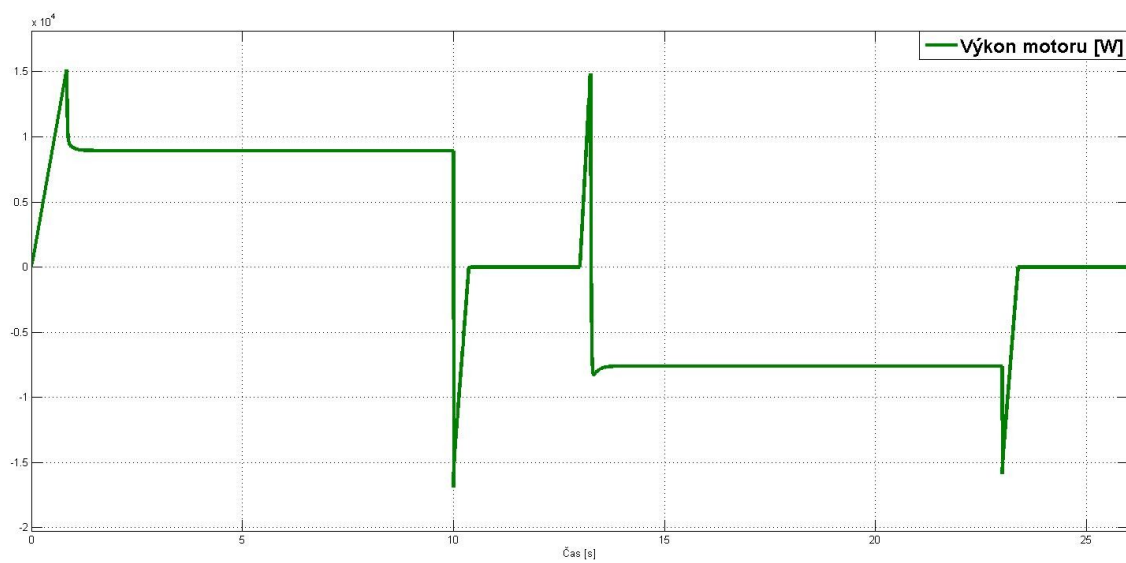
Regulátor otáček typu PI: zesílení $K_{R\omega} = 13,5$



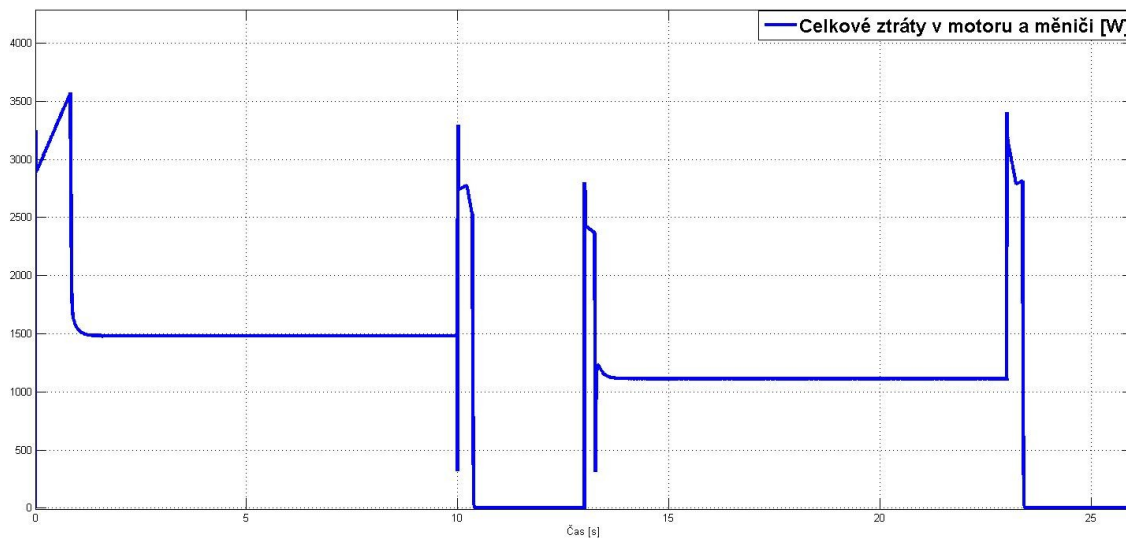
Obrázek 36: *Žádané a skutečné otáčky motoru*



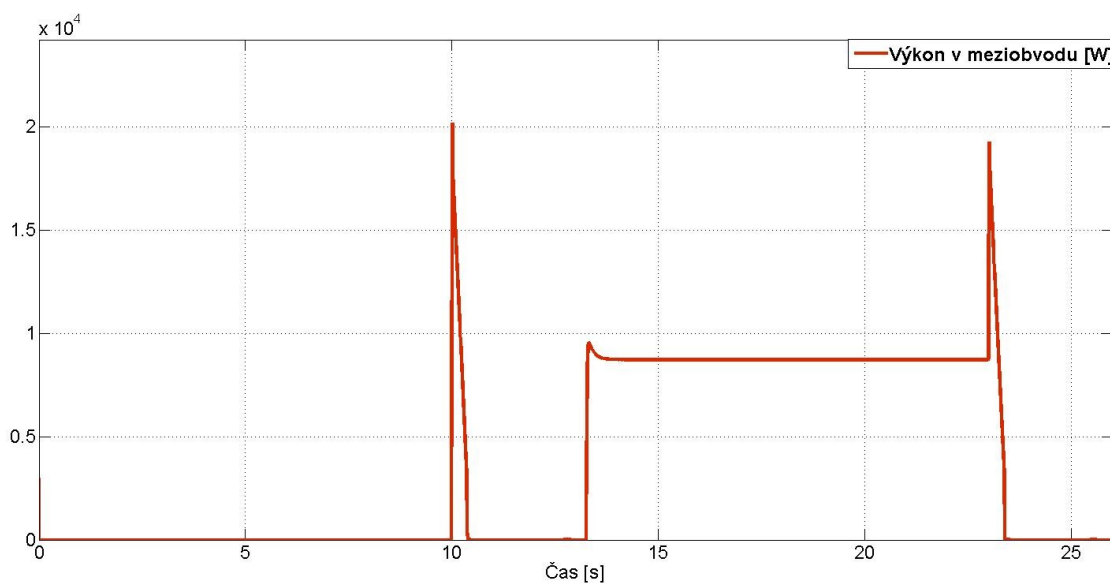
Obrázek 37: *Moment motoru*



Obrázek 38: Výkon motoru



Obrázek 39: Součet ztrát $\Delta P_M + \Delta P_{PM}$



Obrázek 40: Výkon v meziobvodu při brzdění

$$P_{DCstř} = 3573 \text{ W}$$

$$P_{20} = 14,3 \text{ kW}$$

$$P_3 = 21,4 \text{ kW}$$

$$P_{\max} = 20,2 \text{ kW}$$

Navrhovaná brzdná jednotka: Siemens 6SE7023-2EA87-2DA0

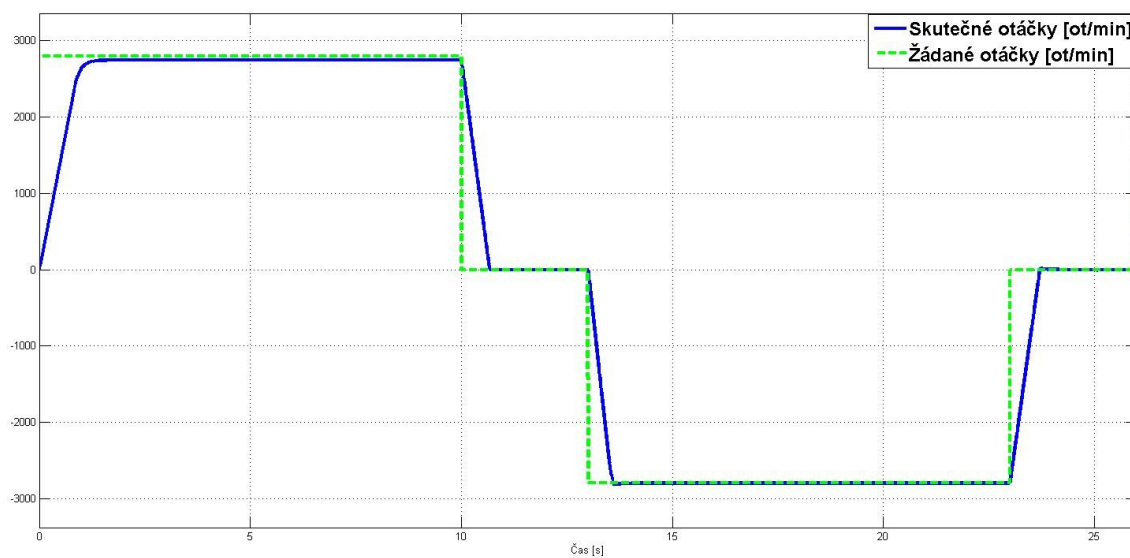
Externí brzdňý odpor: 23-2ES87-2DC0 20 Ω

Při polovičních otáčkách již není nutné výstupní proud regulátoru omezovat. Hodnota P_{20} vychází 14,3 kW. Špičkový výkon P_3 je větší než hodnota maximálního výkonu v meziobvodu. Pro danou situaci postačí brzdná jednotka od společnosti Siemens s označením 6SE7023-2EA87-2DA0, která je dimenzována na hodnotu P_{20} 20 kW. Externí odpor hodnoty 20 Ω s označením 23-2ES87-2DC0.

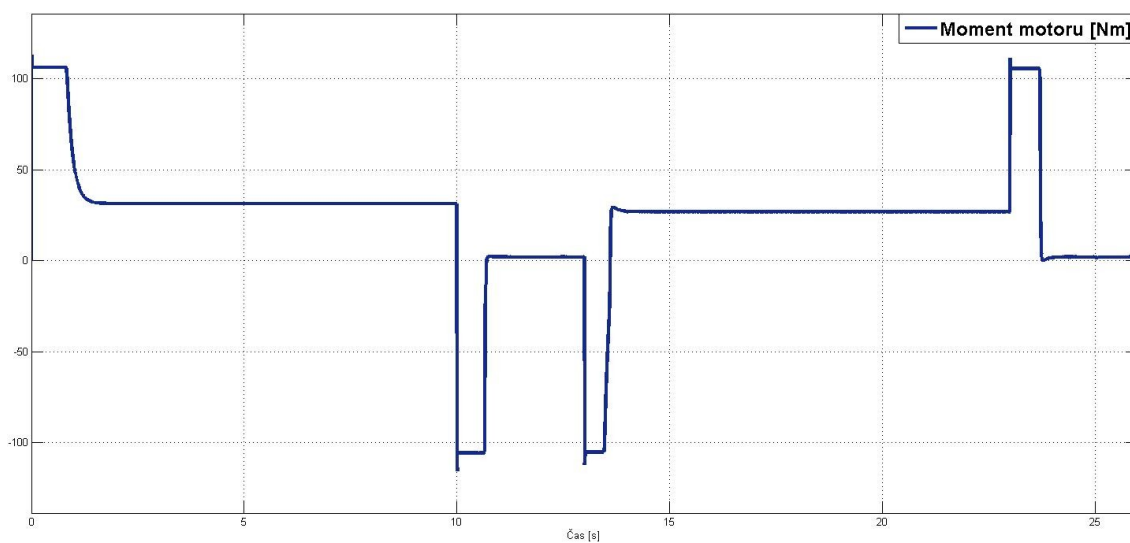
Situace 3

$m = 551 \text{ kg}$, $n = 2800 \text{ ot/min}$, $M_{PM} = 29,3 \text{ Nm}$, $M_{PM}' = 24,8 \text{ Nm}$, $J_c = 0,25 \text{ Nm}$

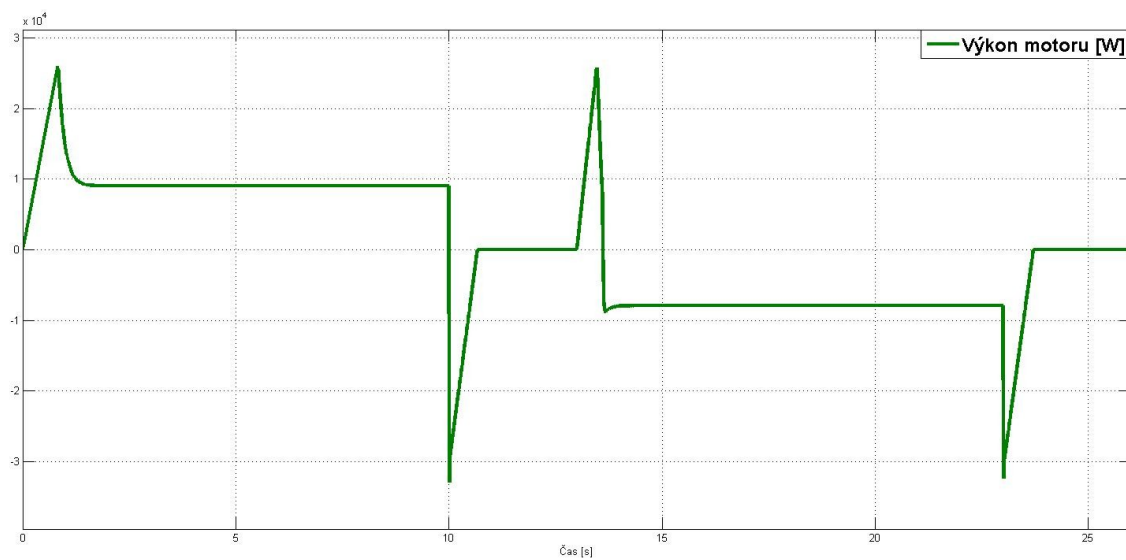
Regulátor otáček typu PI: zesílení $K_{R\omega} = 12,3$



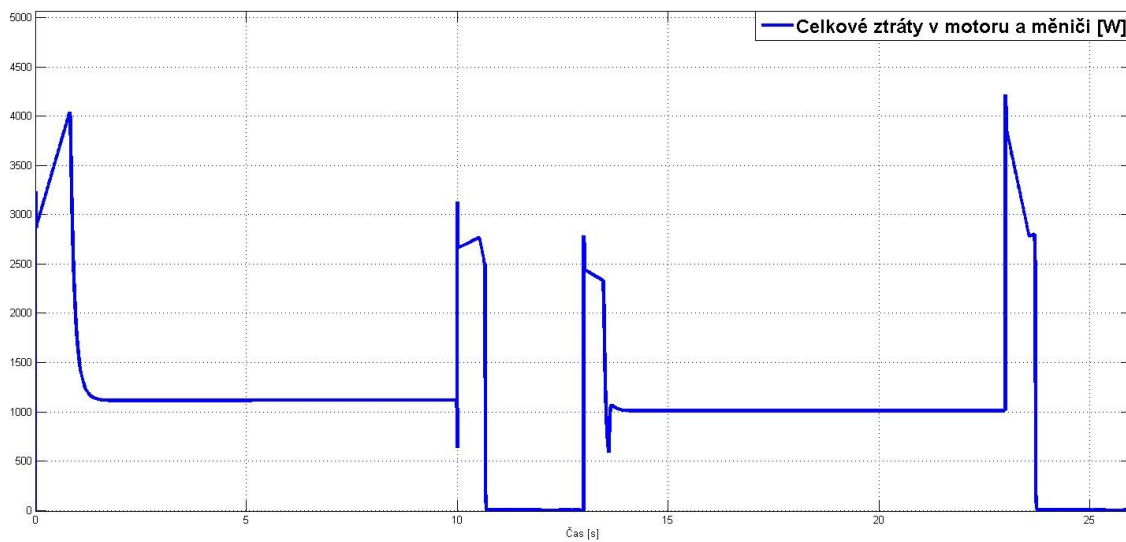
Obrázek 41: Žádané a skutečné otáčky motoru



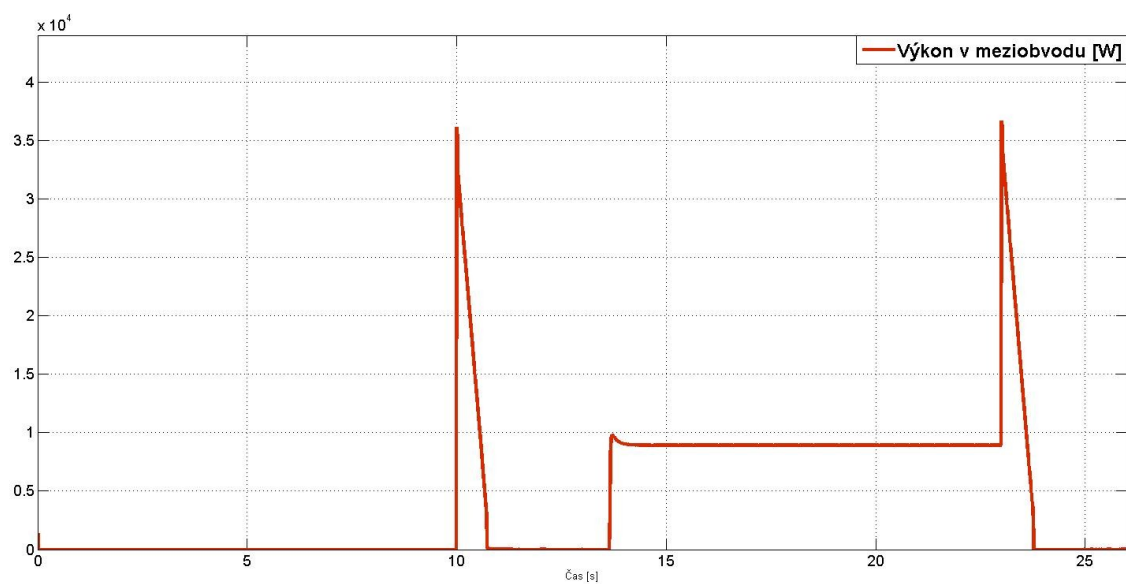
Obrázek 42: Moment motoru



Obrázek 43: Výkon motoru



Obrázek 44: Součet ztrát $\Delta P_M + \Delta P_{PM}$



Obrázek 45: Výkon v meziobvodu při brzdění

$$P_{DCstř} = 4195 \text{ W}$$

$$P_{20} = 16,8 \text{ kW}$$

$$P_3 = 25,2 \text{ kW}$$

$$P_{\max} = 36,6 \text{ kW}$$

Navrhovaná brzdná jednotka: 6SE7028-0EA87-2DA0

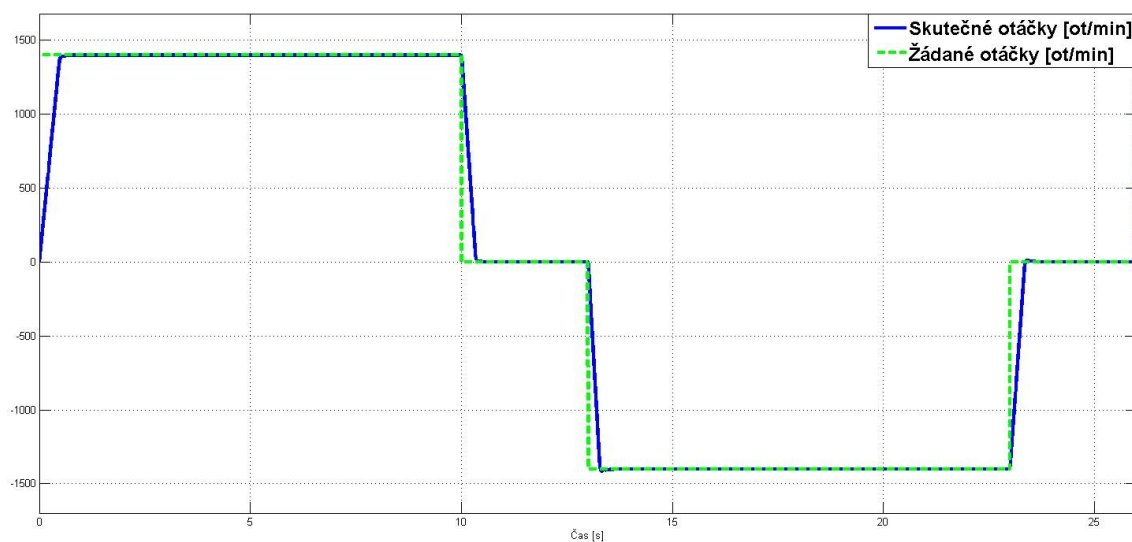
Externí brzdový odpor: 28-0ES87-2DC0 8 Ω

Podle hodnoty P_{20} by postačila brzdná jednotka do 20 kW, avšak vrcholová špička brzdného výkonu je o mnoho větší než špičkový výkon brzdné jednotky. Proto volíme brzdnu jednotku o řád vyšší, tedy s označením 6SE7028-0EA87-2DA0 dimenzovanou na hodnotu P_{20} 50 kW. Externí brzdový odpor bude mít hodnotu 8 Ω s označením 28-0ES87-2DC0.

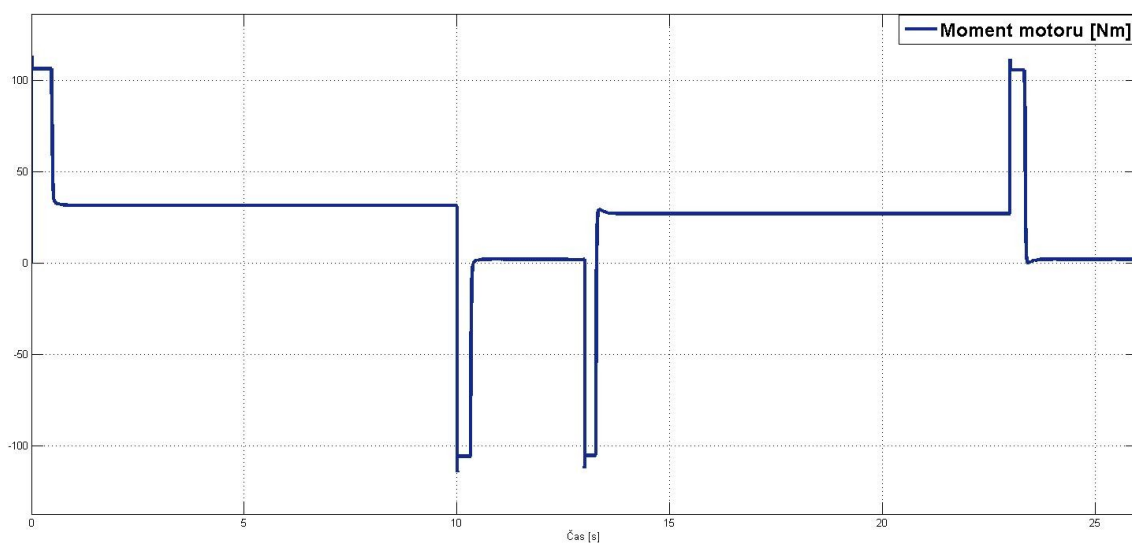
Situace 4

$m = 551 \text{ kg}$, $n = 1400 \text{ ot/min}$, $M_{PM} = 29,3 \text{ Nm}$, $M_{PM}' = 24,8 \text{ Nm}$, $J_c = 0,25 \text{ Nm}$

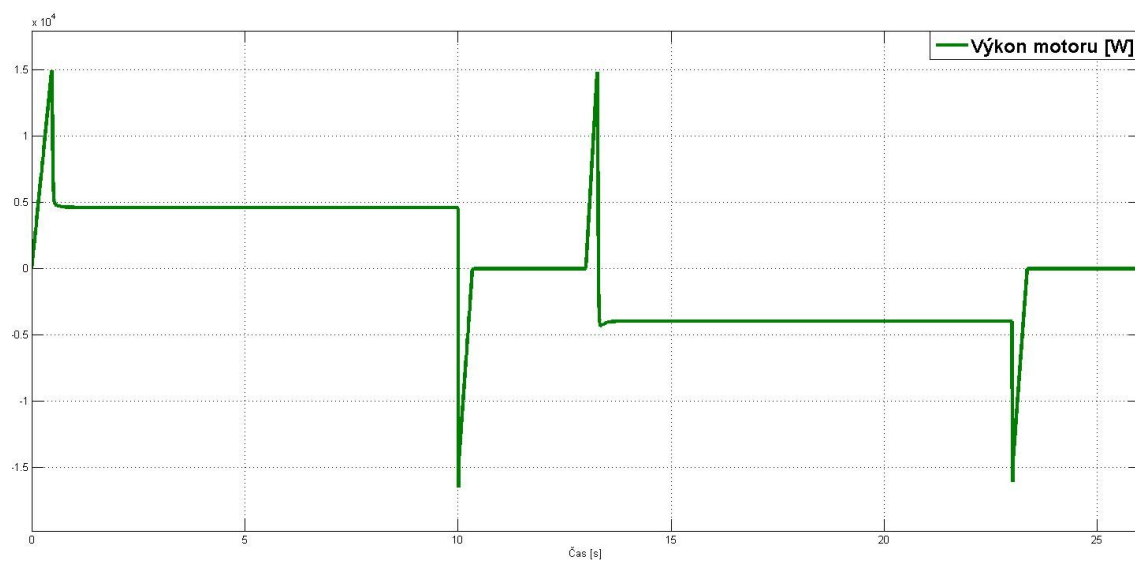
Regulátor otáček typu PI: zesílení $K_{R\omega} = 12,3$



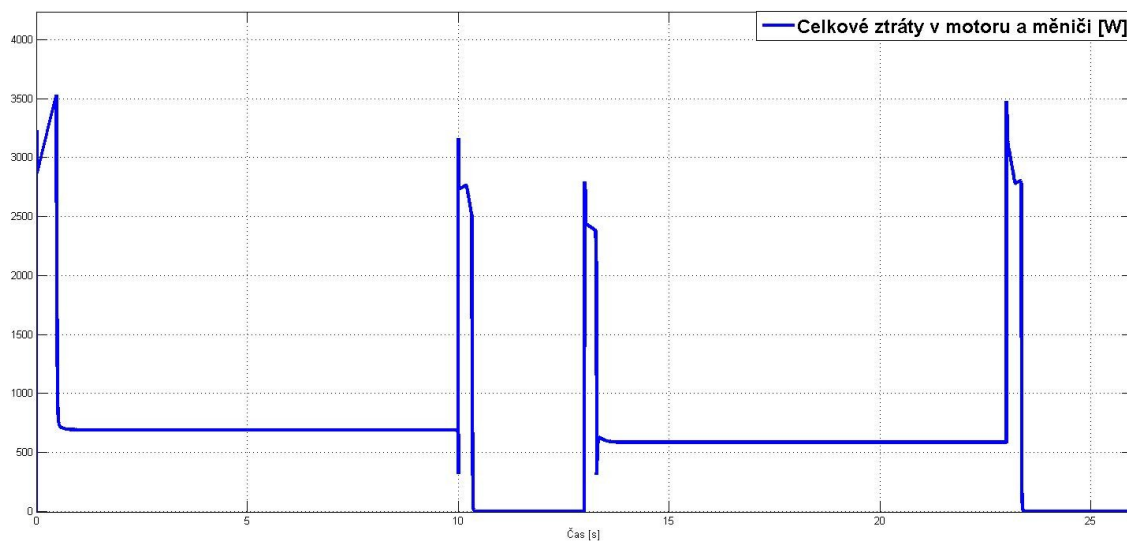
Obrázek 46: *Žádané a skutečné otáčky motoru*



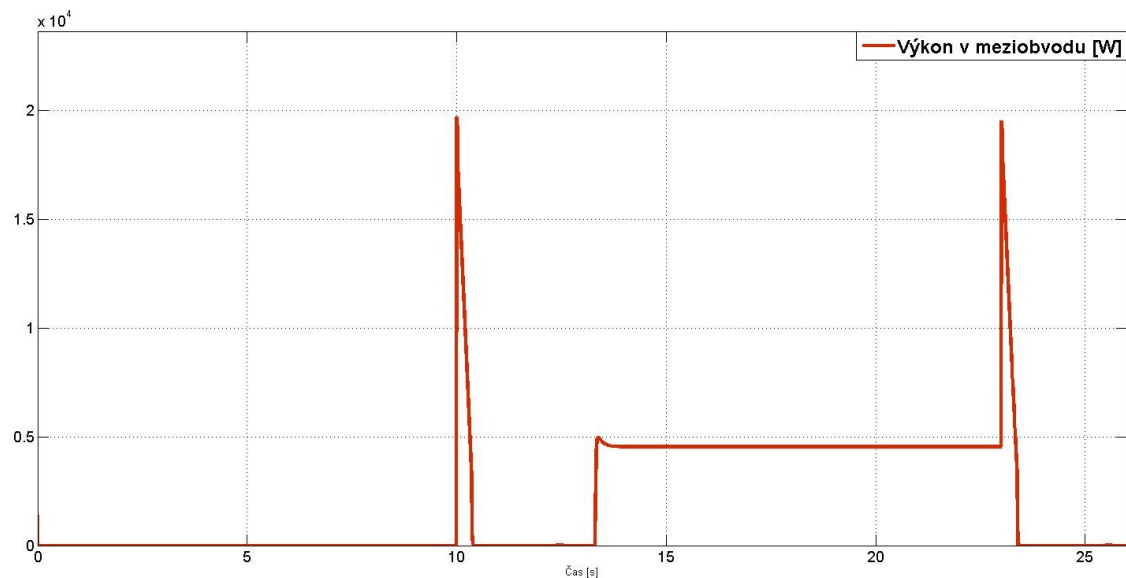
Obrázek 47: *Moment motoru*



Obrázek 48: Výkon motoru



Obrázek 49: Součet ztrát $\Delta P_M + \Delta P_{PM}$



Obrázek 50: Výkon v meziobvodu při brzdění

$$P_{DCstř} = 1979 \text{ W}$$

$$P_{20} = 7,9 \text{ kW}$$

$$P_3 = 11,8 \text{ kW}$$

$$P_{\max} = 19,7 \text{ kW}$$

Navrhovaná brzdná jednotka: 6SE7023-2EA87-2DA0

Externí brzdňý odpor: 23-2ES87-2DC0 20 Ω

Pro poloviční otáčky motoru a poloviční hmotnost zátěže se nabízí brzdná jednotka do 10 kW. Opět vrcholová špička brzdného výkonu je o mnoho větší než špičkový výkon brzdné jednotky. Proto volíme 6SE7023-2EA87-2DA0 dimenzovanou na hodnotu P_{20} 20 kW. Externí odpor s hodnotou 20 Ω. Označení odporové jednotky 23-2ES87-2DC0.

Tabulka vyráběných brzdňých jednotek od firmy Siemens je v příloze F.

6 Závěr

Seznámili jsme se s konstrukcí a principem stejnosměrného stroje. Teoreticky se rozebraly všechny ztráty, které vznikají v DC motoru. Sestavili jsme matematický model podle parametrů reálného motoru TTN20 20Ab firmy MEZ Brno. Pomocí základních bloků jsme v programu Matlab-Simulink sestavili simulační model včetně uvažování ztrát. Spustili simulaci a zobrazili výsledné grafy. Při sečtení ztrát a výkonu se nám výsledná hodnota téměř shodovala s příkonem motoru. Rozdíl je způsoben nepřesností při výpočtu, zaokrouhlením.

Dalším úkolem bylo sestavení matematického a simulačního modelu pulzního měniče. Určování ztrát v měniči je spíše kvalifikovaný odhad, jelikož nebylo možné zjistit dostatek informací o rozložení ztrát. Výsledné grafy se nejspíše budou lišit od reálných hodnot měniče, avšak při dané účinnosti nebude rozdíl až tak velký.

Následně jsme model doplnili o regulační smyčku proudu a rychlosti. Určili zesílení PI regulátorů a potřebné časové konstanty. Na vstup jsme zadali požadované otáčky a spustili simulaci. Výsledné grafy ukazují, že požadovaná hodnota otáček se ustálí za zhruba 0,5s.

V posledním bodě jsme model doplnili o převodovku a plošinu. Při výpočtu hmotnosti plošiny jsme vycházeli z momentu motoru. Určili potřebný moment zátěže pro zvedání a spouštění. Zadali jsme simulační cyklus a načasovali správné připojení momentu zátěže. Podle výsledných hodnot jsme navrhli vhodnou brzdou jednotku s odporem. Následně jsme hmotnost a otáčky zmenšili na polovinu a opět určili vhodnou brzdou jednotku s odporem. Z výsledků vyplývá, že pro dané situace, při maximálních možných otáčkách, je vhodná brzdá jednotka dimenzovaná na 50 kW s 8 Ω odporem. Naopak při polovičních otáčkách postačí brzdá jednotka dimenzovaná na 20 kW s 20 Ω odporem.

Použitá literatura

- [1] Princip stejnosměrných motorů. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/princip-stejnosmernych-motoru>
- [2] VRÁNA, Václav, Stanislav KOCMAN a Václav KOLÁŘ. *STEJNOSMĚRNÉ STROJE* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2006 [[cit. 2015-05-02]. Dostupné z: http://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_stejnosmerne_stroje_bc.pdf
- [3] Magnetismus. [online]. [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz7.htm>
- [4] *Wikipedie:Stejnosměrný motor* [online]. c2015 [citováno 2. 05. 2015]. Dostupný z: http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Stejnosm%C4%9Brn%C3%BD_motor&oldid=12432587
- [5] NEBORÁK, Ivo. Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů. 1. vyd. VŠB-TU Ostrava, 2009, 172 s. ISBN 80-248-0083-7.
- [6] NEBORÁK, Ivo. *Modelování a simulace elektronických systémů - část 2*, Učební texty. VŠB-TU Ostrava, 2006 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.feil.vsb.cz/kat430/data/mases/MaS%20Matlab-Simulink.pdf>
- [7] NEBORÁK, Ivo a Václav SLÁDEČEK. *ELEKTRICKÉ POHONY pro kombinované a distanční studium* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2004 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://feil.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/EP/ELEKTRICKE%20POHONY%201.pdf>
- [8] NEBORÁK, Ivo. *Mechatronicke systémy pro kombinované a distanční studium* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2009 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~hav278/Mechatronicke_systemy/Studijni_opory/Mechatronicke_systemy.pdf
- [9] NEBORÁK, Ivo a Václav VRÁNA. *Navrhování elektrických pohonů* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2012 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.feil.vsb.cz/kat430/data/nep/05%20ztraty%20v%20mk.pdf>
- [10] Neborák, I.: Elektrické regulované pohony I. Učební texty pro kombinované a distanční studium. VŠB-TU Ostrava 2005.
- [11] HRABOVCOVÁ, Valéria a Pavol RAFAJDUS. *Elektrické stroje: Teória a príklady*. Žilinská univerzita v Žiline: ŽU, 2009. ISBN 978-80-554-0101-0

- [12] DUŠEK, František. Matlab a Simulink: úvod do používání. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2005, 172 s. ISBN 80-719-4776-8.
- [13] *Simover Masterdrives: Bremsenheit/Braking Unit* [online]. [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: https://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/electric-drives/maturing-siemens-drives/masterdrives-from-siemens-industry/downloads/Documents/DRV-MasterDrives-6SE70_Components.pdf

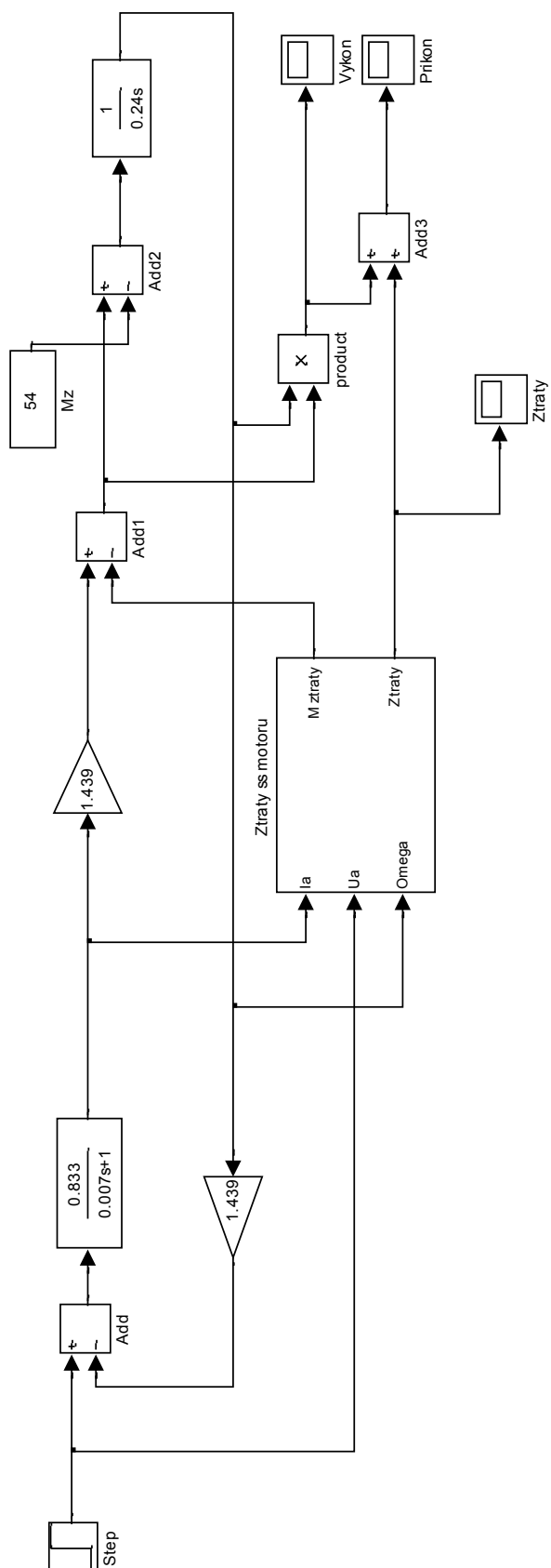
Seznam příloh

Příloha.A: Simulační model stejnosměrného motoru s uvažováním ztrát	I
Příloha.B: Subsystem „Ztráty v motoru“	II
Příloha.C: Simulační model pulzního měniče s uvažováním ztrát.....	III
Příloha.D: Simulační model rychlostní regulace.....	IV
Příloha.E: Simulační model pro vybrané situace a dimenzování brzděné jednotky	V
Příloha.F: Tabulka brzděných jednotek firmy Siemens	VI

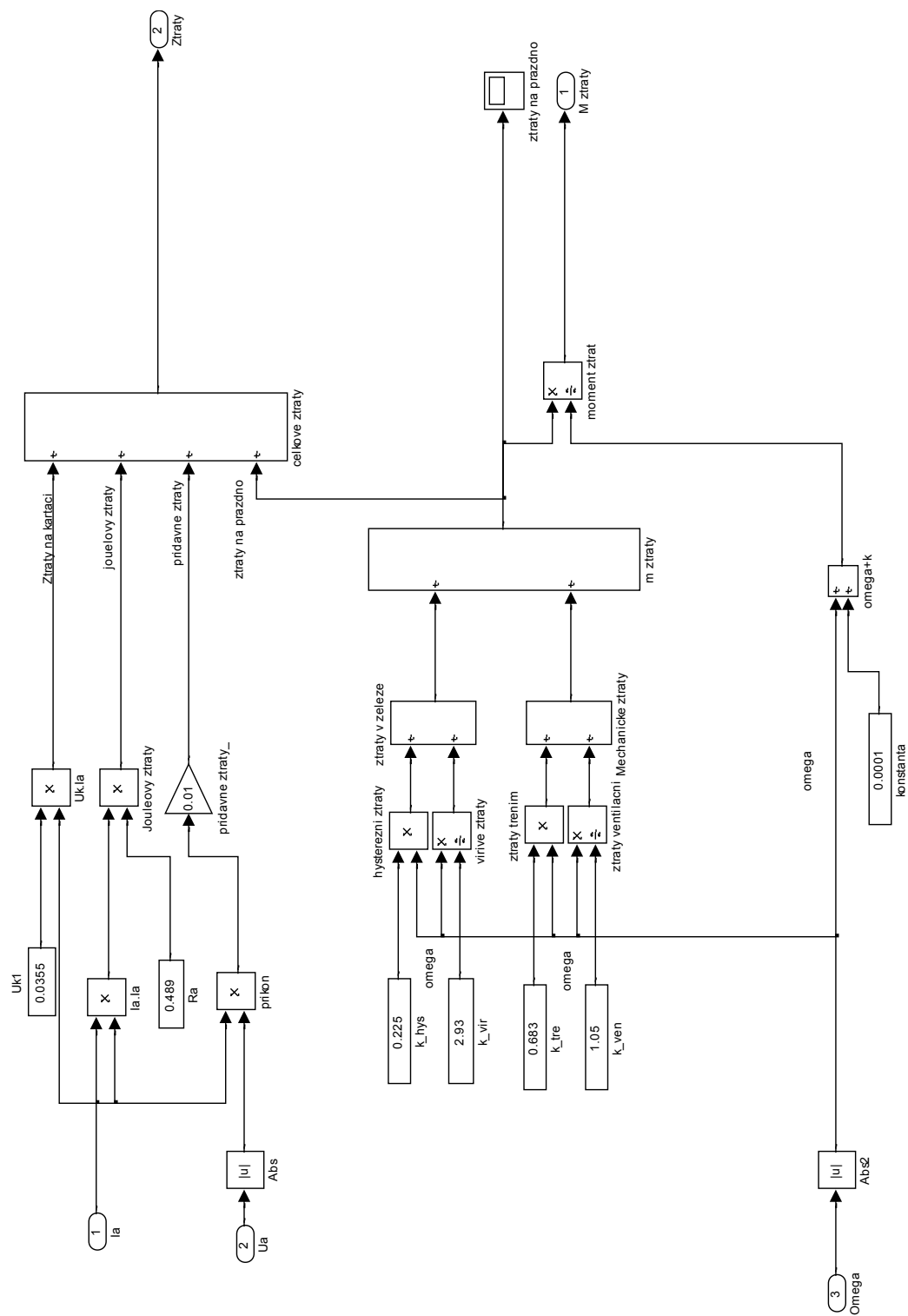
Seznam elektronických příloh

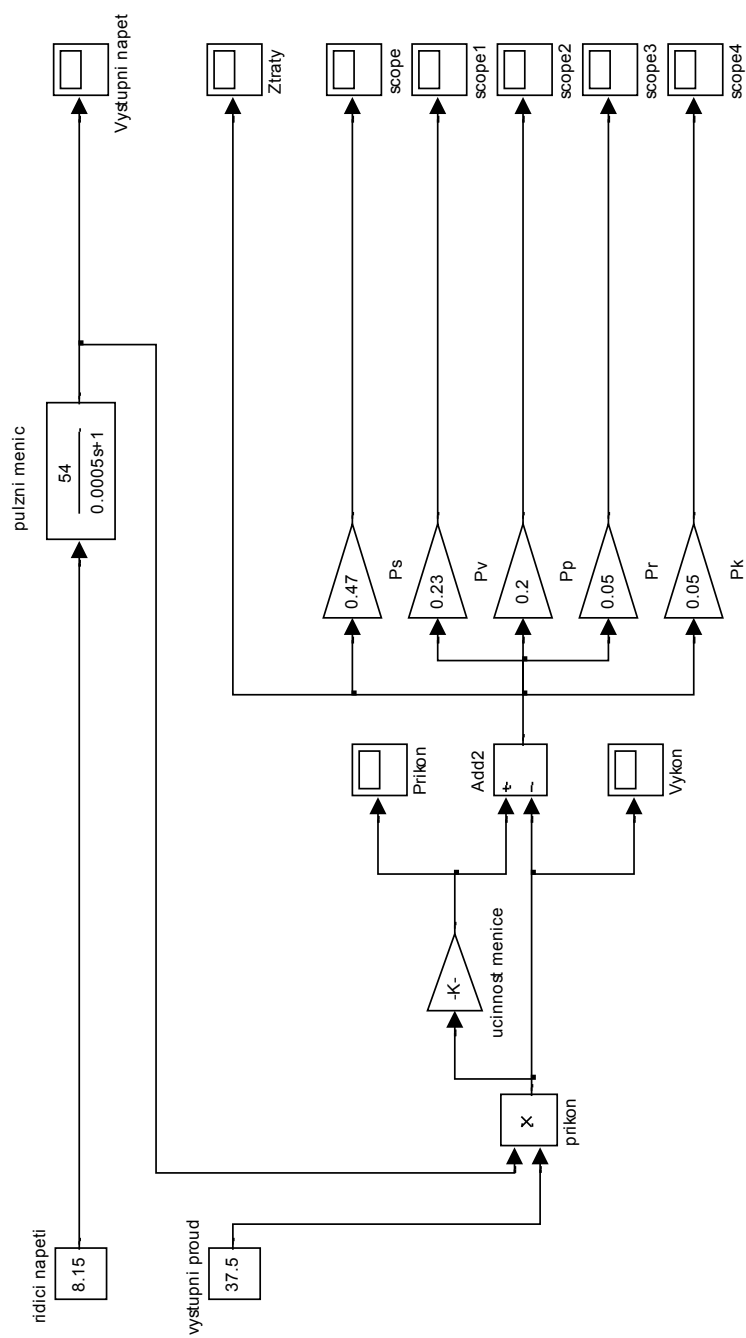
Název souboru	Popis
motor_ztraty.mdl	Simulační model DC motoru s uvažováním ztrát
menic_ztraty.mdl	Simulační model pulzního měniče s uvažováním ztrát
rychlostni_regulace.mdl	Simulační model rychlostní regulace
simulace_zvedani_spousteni.mdl	Simulační model pro dimenzování brzdné jednotky

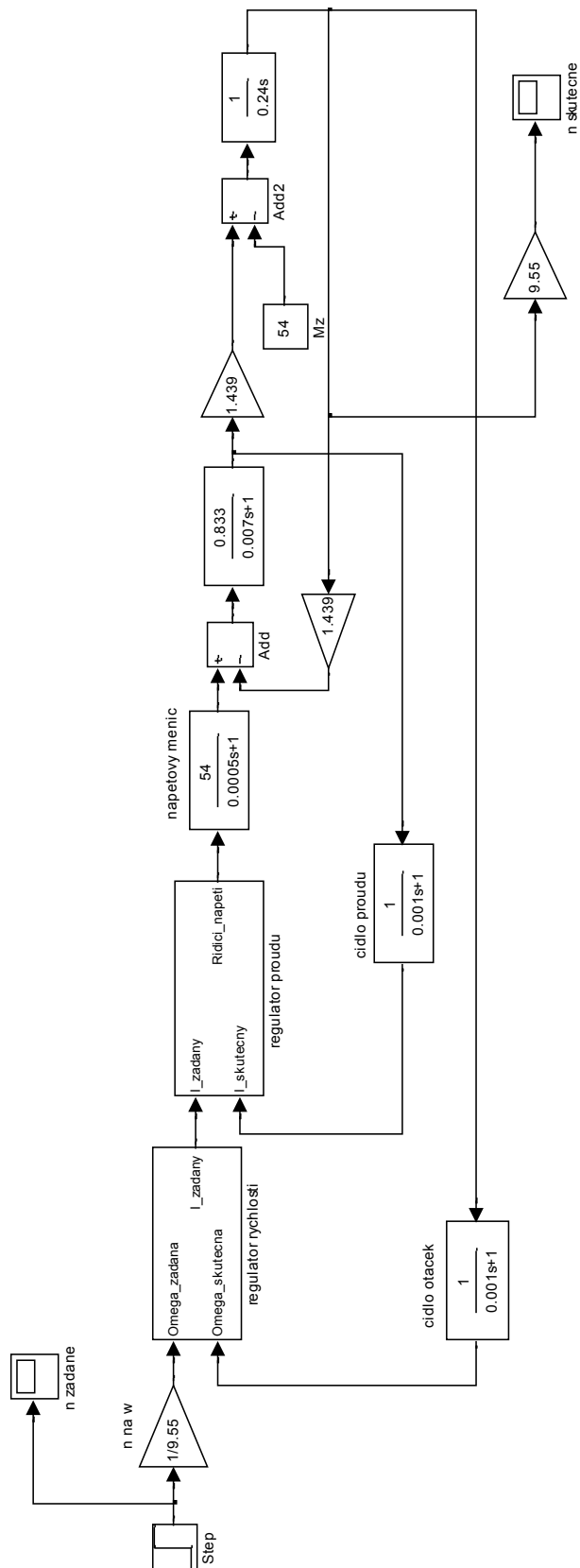
Příloha.A: Simulační model stejnosměrného motoru s uvažováním ztrát



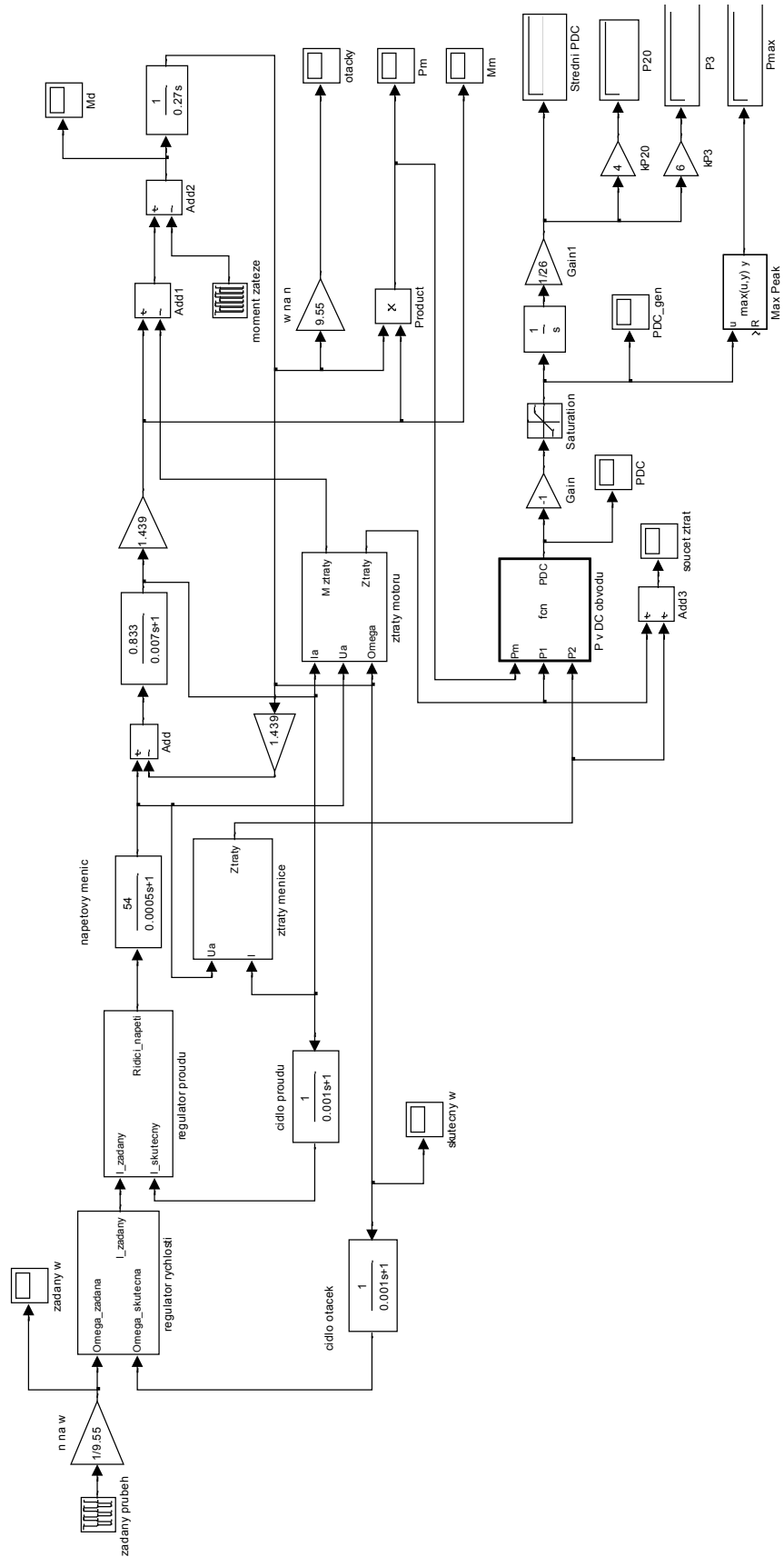
Příloha.B: Subsystem „Ztráty v motoru“







Příloha.E: Simulační model pro vybrané situace a dimenzování brzdné jednotky



Příloha.F: Tabulka brzdných jednotek firmy Siemens [13]

Order Number	Power Rating	Voltage Limit	Rated DC bus Voltage	I _{eff} Amps	Order Number		Cross Section Area		Fuses Type
Braking unit	P ₂₀				Braking resistor		Cu cable		
6SE70...	(kW)	(V)	(V)	(A)	6SE70...	(Ω)	mm ²	AWG	
21-6CS87-2DA0	5	387	280 to 310	7.9	21-6CS87-2DC0	20	1.5	14	3NE4101
18-0ES87-2DA0	5	774	510 to 620	4.0	18-0ES87-2DC0	80	1.5	16	3NE4101
16-4FS87-2DA0	5	967	675 to 780	3.2	16-4FS87-2DC0	124	1.5	16	3NE4101
23-2CA87-2DA0	10	387	280 to 310	16	23-2CS87-2DC0	10	2.5	14	3NE4102
21-6ES87-2DA0	10	774	510 to 620	8	21-6ES87-2DC0	40	1.5	16	3NE4101
21-3FS87-2DA0	10	967	675 to 780	6	21-3FS87-2DC0	62	1.5	16	3NE4101
26-3CA87-2DA0	20	387	280 to 310	32	26-3CS87-2DC0	5	10	6	3NE4120
23-2EA87-2DA0	20	774	510 to 620	16	23-2ES87-2DC0	20	2.5	14	3NE4102
28-0EA87-2DA0	50	774	510 to 620	40	28-0ES87-2DC0	8	10	6	3NE4121
26-4FA87-2DA0	50	967	675 to 780	32	26-4FS87-2DC0	12.4	10	6	3NE4120
25-3HA87-2DA0	50	1158	890 to 930	27	25-3HS87-2DC0	17.8	6	8	3NE4118
31-6EB87-2DA0	100	774	510 to 620	80	31-6ES87-2DC0	4	35	0	3NE3225
31-3FB87-2DA0	100	967	675 to 780	64	31-3FS87-2DC0	6.2	35	0	3NE3224
32-7EB87-2DA0	170	774	510 to 620	135	32-7ES87-2DC0	2.35	50	00	3NE3230-0B
32-5FB87-2DA0	200	967	675 to 780	128	32-5FS87-2DC0	3.1	50	00	3NE3230-0B
32-1HB87-2DA0	200	1158	890 to 930	107	32-1HS87-2DC0	4.45	50	00	3NE3227